

# Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa - kohti ilmastoviisasta suojelualuesuunnittelua

**Kaisu Aapala, Anu Akujärvi, Risto Heikkinen, Juha Pöyry, Raimo Virkkala,  
Juha Aalto, Sonja Forss, Linda Kartano, Eija Kemppainen, Saija Kuusela, Niko  
Leikola, Tuija Mattsson, Ninni Mikkonen, Francesco Minunno, Sirke Piirainen,  
Pekka Punttila, Juha Pykälä, Ari Rajasärkkä, Kimmo Syrjänen ja Minna Turunen**





# Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa - kohti ilmastoviisasta suojelualuesuunnittelua

**Kaisu Aapala, Anu Akujärvi, Risto Heikkinen, Juha Pöyry,  
Raimo Virkkala, Juha Aalto, Sonja Forss, Linda Kartano,  
Eija Kemppainen, Saija Kuusela, Niko Leikola, Tuija Mattsson,  
Ninni Mikkonen, Francesco Minunno, Sirke Piirainen,  
Pekka Punttila, Juha Pykälä, Ari Rajasärkkä, Kimmo Syrjänen  
ja Minna Turunen**



S Y K E

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA I | 2020  
Suomen ympäristökeskus SYKE  
Biodiversiteettikeskus

Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa - kohti ilmastoviisasta suojelualuesuunnittelua

Kirjoittajat: Kaisu Aapala<sup>1</sup>, Anu Akujärvi<sup>1</sup>, Risto Heikkinen<sup>1</sup>, Juha Pöyry<sup>1</sup>, Raimo Virkkala<sup>1</sup>,  
Juha Aalto<sup>2</sup>, Sonja Forss<sup>1</sup>, Linda Kartano<sup>1</sup>, Eija Kemppainen<sup>1</sup>, Saija Kuusela<sup>1</sup>, Niko Leikola<sup>1</sup>,  
Tuija Mattsson<sup>1</sup>, Ninni Mikkonen<sup>1</sup>, Francesco Minunno<sup>3</sup>, Sirke Piirainen<sup>3</sup>, Pekka Punttila<sup>1</sup>,  
Juha Pykälä<sup>1</sup>, Ari Rajasärkkä<sup>4</sup>, Kimmo Syrjänen<sup>1</sup> ja Minna Turunen<sup>5</sup>

<sup>1</sup>) Suomen ympäristökeskus, <sup>2</sup>) Ilmatieteen laitos, <sup>3</sup>) Helsingin yliopisto, <sup>4</sup>) Metsähallitus,  
<sup>5</sup>) Lapin yliopisto

Vastaava erikoistoimittaja: Terhi Rytteri

Rahoittaja/toimeksiantaja: Ympäristöministeriö

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus SYKE  
Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Kansikuva: Maarit Similä, Metsähallitus Luontopalvelut

Taitto: Pirjo Lehtovaara

Julkaisu on saatavana internetistä: [syke.fi/julkaisut](https://syke.fi/julkaisut) | [helda.helsinki.fi/syke](https://helda.helsinki.fi/syke)  
sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: [syke.juvenesprint.fi](https://syke.juvenesprint.fi)

ISBN 978-952-11-5119-4 (nid.)  
ISBN 978-952-11-5120-0 (PDF)  
ISSN 1796-1718 (pain.)  
ISSN 1796-1726 (verkkok.)

Julkaisuvuosi: 2020



## ESIPUHE

Suomen ympäristökeskus toteutti vuosina 2017-2019 ympäristöministeriön rahoituksella ja yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen, Helsingin yliopiston ja Metsähallituksen Luontopalvelujen kanssa *Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa* -hankkeen (SUMI). SUMI-hankkeen keskeisenä tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista Suomen suojelualueverkostoon ja suojelualueilla esiintyviin lajeihin ja luontotyypeihin sekä niihin kohdistuviin muihin uhkiin. Yhtenä keskeisenä tarkastelukohteena olivat EU:n luontodirektiivin liitteiden II ja IV lajit sekä lintudirektiivin lajit sekä luontodirektiivin liitteen I luontotyypit. Toisena keskeisenä tutkimuskohteena oli luonnontilaisten metsien hiilitase.

Tähän loppuraporttiin on koottu hankkeen kirjallisuuskatsauksesta ja tutkimuksista keskeisiä tuloksia. Alkuperäisiin julkaisuihin on viitattu tekstissä.

Hankkeen ohjausryhmässä olivat edustettuina ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, Ilmatieteen laitos, Luonnontieteellinen keskusmuseo Luomus, Luonnonvarakeskus, Metsähallituksen Luontopalvelut sekä Metsähallitus Metsätalous Oy. Ohjausryhmän puheenjohtajana toimi ympäristöneuvos Mikko Kuusinen ympäristöministeriöstä.

Luonnonsuojelualueverkoston toimivuuden ja riittävyyden arviointi ilmastonmuutoksen näkökulmasta on erittäin ajankohtaista. Pitkän tähtäimen tavoitteena on niin kutsuttu ilmastoviisas luonnonsuojelu, jota tämä tutkimushanke osaltaan edistää.

Helsingissä tammikuussa 2020

Risto Heikkinen

## TIIVISTELMÄ

### Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa - kohti ilmastoviisasta suojelualuesuunnittelua

Ilmastoviisaan luonnonsuojelusuunnittelun perustana on tieto siitä, millä alueilla ilmasto muuttuu voimakkaimmin, mitkä suojelualueet, lajit ja lajipopulaatiot sekä luontotyypit ovat kaikkein alttiimpia muutokselle ja miten muutokseen sopeudutaan. SUMI-hankkeessa selvitettiin lämpösumman, tammikuun keskilämpötilan ja vuosittaisen vesitaseen muutosnopeutta ja pienilmastollisia muutoksia Suomen Natura 2000 -verkostossa. Lämpösumman ja tammikuun lämpötilan ennustetuissa muutosnopeuksissa on merkittäviä alueellisia eroja ja Natura-alueiden pienilmasto tulee muuttumaan huomattavasti. Avainasemassa on turvata lajit, joiden populaatioiden menestyminen liittyy nopeimmin muuttuviin ilmastotekijöihin. Suojelualuesuunnittelussa tulee painottaa suojelu- ja hoitotoimien joustavaa suunnittelua sekä varautua mittaviin olosuhteiden muutoksiin. Ennallistaminen ja luonnonhoito ovat tärkeitä keinoja lajien elinympäristöjen ja luontotyyppien tilan parantamiseksi muuttuvassa ilmastossa. Kohdentamalla ennallistamista ja luonnonhoitoa ilmastoviisaasti voidaan tukea lajien siirtymistä.

Lajien ominaisuudet vaikuttavat niiden haavoittuvuuteen ilmastomuutokselle; negatiiviset vaikutukset korostuvat pohjoisen viileisiin oloihin, kuten tunturi- ja suoelinympäristöihin, erikoistuneilla lajeilla, joiden leviämiskyky on rajoittunut. Eri eliöryhmillä nousi esille myös muita lajien haavoittuvuutta ilmastomuutokselle heijastelevia ominaisuuksia, joita on tärkeää huomioida lajien hoito- ja suojelusuunnittelussa. Lajien ominaisuuksien perusteella tunnistettiin joukko ilmastomuutokselle haavoittuvimpia lajeja, joihin suojelutoimia kannattaa kohdentaa. Luontodirektiivilajien - ja etenkin saman lajin populaatioiden - välillä oli selviä eroja lajien altistumisessa lämpösumman ja tammikuun lämpötilan muutosnopeuteen, sekä esiintymien ympäristön haitallisen maankäytön määrässä.

SUMI-hankkeessa tarkasteltiin suojelualueverkoston merkitystä maalinustolle sekä havaittujen että ennustettujen levinneisyysmuutosten osalta. Suojelullisesti arvokkaiden suo- ja tunturilajien lajimäärä pieneni sekä suojelualueilla että suojelemattomilla alueilla, kun taas kosteikkolajien määrä kasvoi koko maassa. Suojelualueet puskuroivat ilmastomuutoksen negatiivisia vaikutuksia suojelullisesti merkittävillä lajeilla, mutta vaikutukset ovat jo nähtävissä niilläkin. Linnuston monimuotoisuuden kannalta suojelualueverkosto on perustettu ilmastomuutoksen näkökulmasta oikeansuuntaisesti, mutta Etelä- ja Keski-Suomessa metsien suojelualueverkosto on riittämätön turvaamaan lintulajiston monimuotoisuuden.

Ilmastomuutoksen vaikutukset luontotyyppeihin ovat ensisijassa laadullisia. Herkimmiksi luontotyypeiksi on tunnistettu rannikon hauru- ja meriajokasvallit sekä primäärisuknessioon liittyvät luontotyypit, lumenviipymät, tunturikoivikot, tunturikankaat, virtavesien latvapurot, Tunturi-Lapin pienvedet, perinnebiotoopit, palsasuot, eteläiset aapasuot, lähteet ja lähdesuot sekä avoimet ja puoliavoimet kallioluontotyypit. Ilmastomuutoksen myötä lisääntyvien luontaisten häiriöiden arvioidaan vaikuttavan positiivisesti metsien rakenteeseen lisäämällä kuolleen puun sekä runsaslahopuustoisten nuorten sukessiovaiheiden ja lehtipuiden määrää.

Monimuotoiset metsät ovat avainasemassa metsien ekosysteemipalveluiden ja sopeutumiskyvyn turvaamisessa. SUMI-hankkeessa kehitettiin laskentamenetelmää, jonka avulla voidaan arvioida metsän käsittelytapojen ja ilmastomuutoksen vaikutuksia metsien hiilitaseeseen tarkalla resoluutiolla. Alustavien mallinnustulosten mukaan puuston ja metsämaan hiilivarasto kasvoi sekä suojelumetsä- että talousmetsäskenaariossa Evon alueella vuosina 2013–2099. Suojelumetsä sitoi hiiltä hitaammin kuin talousmetsä mutta säilyi hiilen nieluna koko tarkastelujakson ajan. Yhdistämällä hiilitasearviot luonnon monimuotoisuutta kuvaaviin paikkatietoaineistoihin voidaan suojelualuesuunnittelussa priorisoida sekä ilmastohyödyiltään että luontoarvoiltaan parhaita kohteita.

#### Asiasanat:

Ilmastomuutos, suojelualueverkosto, ilmastomuutoksen nopeus, lajit, luontotyypit, metsien hiilitase

## SAMMANDRAG

### Skyddsområdesnätverk i ett föränderligt klimat – mot klimatsmart naturvårdsplanering

Klimatsmart naturvårdsplanering bygger på kunskap om var klimatet förändras kraftigast, vilka skyddsområden, arter, populationer och naturtyper är mest utsatta för förändringar och hur anpassning till förändringen kan ske. SUMI-projektet utredde hur värmesumman, medeltemperaturen i januari och den årliga vattenbalansen har förändrats och vilka förändringar har skett i mikroklimatet i Natura 2000-nätverket i Finland. Prognoserna för värmesumman och medeltemperaturen i januari visar på avsevärda regionala skillnader samt märkbara förändringar i mikroklimatet i Natura-områdena. Det centrala är att värna om de arter vars populationers livskraftighet påverkas av de klimatfaktorer som förändras snabbast. Skyddsområdesplaneringen bör betona flexibilitet i planeringen av skydds- och vårdåtgärder samt bereda för omfattande förändringar i förhållandena. Återställande och naturvård är viktiga sätt att förbättra arternas livsmiljöers och naturområdenas tillstånd i ett föränderligt klimat. Genom att rikta återställande och naturvårdande insatser klimatsmart kan man stöda arternas flyttning.

Arternas egenskaper påverkar hur sårbara de är för klimatförändringen. Speciellt negativt påverkas arter som är specialiserade på svala förhållanden i norr, som livsmiljöer i fjäll och myrar, och har en begränsad förmåga att breda ut sig. Olika organismgrupper kan även ha andra egenskaper som reflekterar deras sårbarhet för klimatförändring, som bör beaktas i planeringen av arternas vård och skydd. Ett antal arter identifierades, utgående från sina egenskaper, som mest sårbara för klimatförändringen. Det är värt att rikta skyddsåtgärderna till dessa arter. Bland arterna som berörs av naturvårdsdirektivet – och speciellt bland olika populationer av samma art – fanns stora skillnader i hur arterna blivit utsatta för förändringarna i värmesumman och i medeltemperaturen för januari. Olika arter hade också drabbats i olika hög grad av skadlig markanvändning i närheten av förekomsterna.

SUMI-projektet undersökte skyddsnätverkets betydelse för landfågelstammen både vad gäller observationer och prognoser för utbredningen. Skyddsmässigt värdefulla myr- och fjällarter minskade i antal både på skyddade och oskyddade områden, medan våtmarksarterna ökade i hela landet. Skyddsområdena mildrar de negativa effekterna av klimatförändringen för skyddsmässigt viktiga arter, men även dessa har redan påverkats. Skyddsområdesnätverket har anlagts på rätt sätt med tanke på klimatförändringens inverkan på fågelstammens diversitet, men skogarnas skyddsområdesnätverk räcker inte till i södra och mellersta Finland att trygga fågelstammens diversitet.

Klimatförändringen påverkar naturtyperna i första hand kvalitativt. Som känsligaste naturtyper identifierades kustens driftvallar och naturtyper sammanhängande med primärsuccessionen, snölegor, fjällbjörkskogar, fjällhedar, små bäckar, små vattendrag i nordvästra Lappland, vårdbiotoper, palsamyrar, sydliga aapamyrar, källor och källkärr, samt öppna och halvöppna hällmarker. De naturliga störningar som ökar i antal med klimatförändringen antas inverka positivt på skogens sammansättning genom en ökning av död ved samt av unga successionsfaser med mycket död ved och av antalet lövträd.

Skogar med hög diversitet har en nyckelroll för att trygga skogarnas ekosystemtjänster och anpassning. SUMI-projektet utvecklade en beräkningsmetod med noggrann resolution som kan användas för att uppskatta inverkan av skogsvårdsmetoder och klimatförändringen på skogens kolbalans. Preliminära beräkningar ger vid handen att trädbeståndets och skogsmarkens kolförråd ökar både med skogsskydds- och ekonomiskogsscenariet för Evo området åren 2013 – 2099. Den skyddade skogen lagrade kol långsammare än ekonomiskogen men förblev kolsänka under hela perioden. Genom att kombinera kolbalansuppskattningen med geografisk information om naturens mångfald kan skyddsområdesplaneringen prioritera områden som är bäst både med tanke på klimatnyttan och naturvärdena.

#### Nyckelord:

Klimatförändring, skyddsområdesnätverk, klimatförändringens hastighet, arter, naturtyper, skogens kolbalans

## ABSTRACT

### Protected area network in a changing climate - towards climate-smart conservation planning

The key to climate-smart conservation planning is the understanding of where climate is changing most rapidly, and which conservation areas, species, populations and habitats are most susceptible to projected changes and how to adapt to them. In the SUMI project, the regional and local patterns in climate change velocity of growing degree days (GDD), mean temperature in January and annual water balance, and changes in local climate within the Finnish Natura 2000 areas, were investigated. The predicted velocity of GDD and January temperature changes showed substantial regional variation, and the local topoclimates of the Natura 2000 areas were predicted to change notably. Protecting the species whose success depends on the most rapidly changing climate variables is in the key role. Conservation planning should emphasize the flexible planning of protection and management actions and be prepared for large changes in the environmental conditions. Ecological restoration and management are important means of improving the state of habitats in the changing climate. Climate-smart allocation of ecological restoration and management may provide important support for the movement and dispersal of species.

The properties of species affect their vulnerability to climate change; the negative effects are emphasized with the species specialized in cool conditions, such as alpine and mire habitats in the north, and whose dispersal potential is limited. Other properties reflecting the vulnerability of species to climate change were emerged; these are also important to consider in conservation and management planning. A group of species that is the most vulnerable to climate change and to which the conservation actions are worth allocating was identified based on their properties. The Habitats directive species – and especially the populations within species – had clear differences in their exposure to GDD and January temperature changes, and the amount of harmful land uses surrounding the occurrences.

In the SUMI project, the importance of the conservation area network to terrestrial bird species was examined considering both the observed and predicted distributions. The number of species of conservation concern in mire and alpine habitats decreased both in and outside the conservation areas, whereas the number of wetland species increased across the country. The conservation areas buffered the negative effects of climate change to species of conservation concern although the effects of climate change were already evident also for these species. From the point of view of bird diversity in the changing climate, the conservation area network has been established basically correctly. However, in Central and Southern Finland, the conservation area network of forests is inadequate to safeguard the diversity of bird species.

Climate change affects mostly the quality of habitat types. The most sensitive habitat types identified were coastal drift lines and the habitat types related to primary succession stages, snowbeds, mountain birch forests, mountain heaths, first order streams, small inland waters in northern Lapland, traditional rural biotopes, palsa mires, southern aapa mires, springs and spring mires, and open and semi open rock outcrops. The natural disturbances becoming more frequent because of climate change are estimated to affect positively the structure of forests. The disturbances will increase the amount of dead wood, early succession stages rich in dead wood as well as deciduous trees.

Structural diversity is a key in safeguarding the ecosystem services and the adaptive capacity of forests. A method to estimate the impacts of management practices and climate change on the carbon budget of forest at a high spatial resolution was developed during the SUMI project. Based on the preliminary modelling results, the carbon stock of trees and soil increased both with the conservation and commercial forest management scenarios in the Evo region in 2013-2099. The carbon uptake rate of the conserved forest was lower than that of the managed forest. However, also the conserved forest acted as a sink of carbon throughout the study period. By combining carbon budget estimates with spatially explicit data on biodiversity the most valuable areas both climate- and biodiversity-wise can be prioritized in conservation area planning.

#### Keywords:

climate change, conservation area network, climate change velocity, species, habitats, forest carbon budget

## SISÄLLYS

<b>Esipuhe</b> .....	3
<b>Tiivistelmä</b> .....	4
<b>Sammandrag</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	6
<b>1 Johdanto ja tausta</b> .....	9
<b>2 Ilmastonmuutoksen nopeus ja luonnonsuojelusuunnittelu</b> .....	14
2.1 Ilmastonmuutoksen nopeusindeksin laskeminen ja käyttö .....	15
2.2 Ilmastonmuutoksen nopeus Suomessa ja Natura 2000 -verkostossa.....	16
2.3 Pienilmaston vaihtelu Natura 2000 -alueilla nyt ja tulevaisuudessa.....	17
2.4 Ilmastonmuutoksen nopeus ja suojelualuesuunnittelu .....	18
2.5 Lisätietoja menetelmistä .....	19
<b>3 Lajien ominaisuudet ja haavoittuvuus ilmastonmuutokselle</b> .....	20
3.1 Lajien haavoittuvuus ilmastonmuutoksen vaikutuksille .....	20
3.1.1 Lajiominaisuuksien käyttö haavoittuvien lajien tunnistamisessa ....	21
3.1.2 Lajien haavoittuvuus lajiryhmittäin .....	22
3.1.3 Lajiominaisuuksien tarkastelua.....	26
3.1.4 Varautuminen ilmastonmuutokseen .....	27
3.2 Suojelualueverkoston merkitys lintupopulaatioille ilmaston muutuessa.....	27
3.2.1 Havaitut ja ennustetut levinneisyysmuutokset suojelualueilla ja suojelualueiden ulkopuolella .....	28
3.2.2 Koko pesimälintulajiston levinneisyyden muutokset .....	30
3.2.3 Lintulajien runsauden muutokset ja populaatioiden painopisteiden siirtyminen .....	32
3.2.4 Tulevaisuuden tutkimustarpeet.....	34
3.3 Direktiivilajien altistuminen ilmastonmuutokselle ja haitalliselle maankäytölle .....	34
<b>4 Luontotyypit muuttuvassa ilmastossa</b> .....	40
4.1 Luontotyyppien herkkyys ilmastonmuutokselle .....	40
4.1.1 Luontotyyppiryhmittäiset tulokset .....	41
4.2 Ilmastonmuutoksen ja maankäytön aiheuttamat riskit Natura-alueiden direktiiviluontotyyppien esiintymille.....	43
4.3 Ennallistaminen ja luonnonhoito tukevat sopeutumista ilmastonmuutokseen.....	47
4.3.1 Miten ilmastonmuutos vaikuttaa ja miten se tulisi ottaa huomioon ennallistamis- ja luonnonhoitotöissä ja niiden kohdentamisessa .....	47
4.3.2 Asiantuntijatyöpajassa pohdittiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia ennallistamiseen ja luonnonhoitoon .....	47
4.3.3 Ilmastonmuutos osaksi ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelua.....	49

<b>5 Luonnontilaisten metsien hiilitase</b> .....	50
5.1 Mitä luonnontilaisten metsien hiilitaseesta tiedetään?.....	50
5.2 Metsän hiilitaseen laskentamenetelmä .....	51
5.3 Vanhan metsän hiilinielu säilyy .....	52
<b>6 Tietotarpeet</b> .....	55
<b>Viitteet</b> .....	58



# 1 Johdanto ja tausta

Yksittäisistä luonnonsuojelualueista koostuvalla suojelualueverkostolla on jo pitkään ollut Suomessa, Euroopassa ja globaalisti keskeinen merkitys luonnon monimuotoisuuden turvaamisessa (Butchart ym. 2012; Gillingham ym. 2015; Hannah 2008; Thomas ja Gillingham 2015; Virkkala ym. 2014). Suojelualueilla esiintyviä lajipopulaatioita, luontotyyppejä ja ekosysteemejä pidettiin luonnonsuojelusuunnittelussa aiemmin varsin staattisina, satunnaisille häiriöille hyvin puskuroituneina luonnon elementteinä, joille suojelualueet tarjoavat turvaa myös pitkällä aikavälillä (Lawler ym. 2015; Thomas ja Gillingham 2015; Tingley ym. 2014). Tämä käsitys on muuttumassa viime vuosikymmeninä tapahtuneen globaalin ilmaston lämpenemisen sekä etenkin kuluvalle vuosisadalle ennustettujen laajamittaisten lämpötilojen ja sademäärien muutosten takia, jotka voivat vaikuttaa ekosysteemeihin merkittävästi (Arnell ym. 2019; Hansen ym. 2012; Jackson ym. 2009; Williams ja Jackson 2007; Willis ym. 2010). On tärkeää huomata, että nämä muutokset tulevat vaikuttamaan kaikkiin suojelualueisiin, myös suurikokoisiin suojelualueisiin, jotka voivat olla vastustuskykyisiä muiden muutostekijöiden kuten haitallisen maankäytön vaikutuksille (Sieck ym. 2011; Thomas ja Gillingham 2015; Tingley ym. 2014; Virkkala ym. 2013a; Virkkala ym. 2014; Virkkala ja Rajasärkkä 2011).

Ilmaston muuttumista kuvaavien, voimakkuudeltaan eritasoisten ilmastoskenaarioiden (Taylor ym. 2012) ennusteiden mukaan suojelualueiden paikallisilmasto voi muuttua tuntuvasti. Tämä ilmenee paitsi lämpöolojen ja sademäärän myös paikallisilmaston kosteuspuiteolosuhteiden muutoksina sekä poikkeuksellisten sääolojen (hellejaksot, kuivuus, rankkasateet) yleistymisenä (Arnell ym. 2019; Lehtonen ja Jylhä 2019; Smith 2011). Näillä muutoksilla voi olla huomattavia vaikutuksia suojelualueiden eliöyhteisöihin (Dawson ym. 2011; Mawdsley ym. 2009; Tingley ym. 2014). Voimakkaimpien ennusteiden mukaan ilmastonmuutos voi pahimmillaan aiheuttaa huomattavan määrän lajipopulaatioiden häviämisiä suojelualueilta (Araújo ym. 2011; Araújo ym. 2004; Thomas ym. 2004). Ilmastonmuutoksen aiheuttama uhka luonnon monimuotoisuuden säilymiselle on tärkeä huomioida myös Suomen suojelualueverkostossa, joka on pohjoisen sijaintinsa takia huomattavan altis muuttuvan ilmaston vaikutuksille. Tämä johtuu siitä, että ilmaston ennustetaan lämpenevän pohjoisilla alueilla suhteessa voimakkaammin kuin maapallon muissa osissa (ACIA 2004; Post ym. 2009).

Ilmastonmuutoksen ja muiden globaalien muutostekijöiden, kuten maankäytön ja vieraslajien, merkittävä rooli luonnon monimuotoisuuteen kohdistuvina uhkina on tunnistettu kansainvälisten sopimusten ja toimikuntien raporteissa ja julkilausumissa. IPCC:n eli hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) elokuussa 2019 julkaiseman raportin mukaan ilmastonmuutoksen ja maankäytön välillä on merkittävä yhteys, joka vaikuttaa haitallisesti luonnon monimuotoisuuteen (IPCC 2019a). Syyskuussa julkaistu raportti puolestaan kertoo, että lämpenemisen myötä lumen ja ikeroudan luonnehtimat alueet ovat pienentyneet,

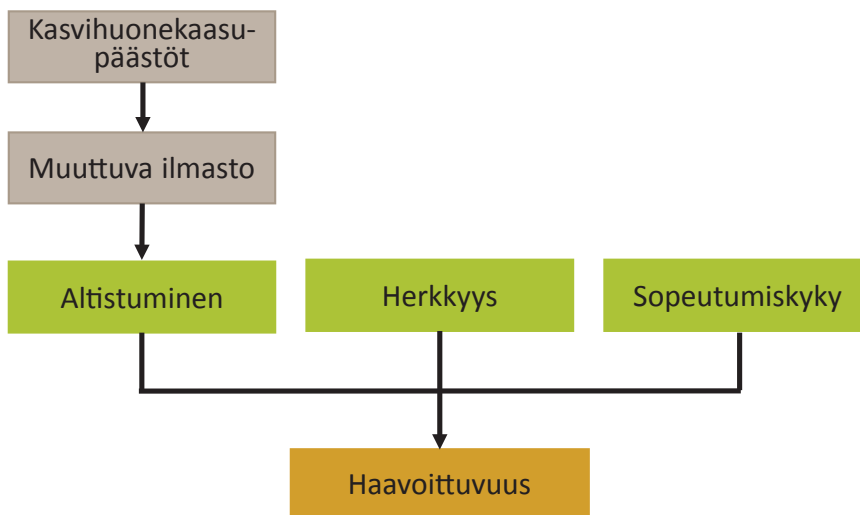
valtamereet ovat lämmenneet ja merenpinnan nousu on kiihtynyt (IPCC 2019b). Lisäksi nopeasti lisääntynyt maankäyttö on osaltaan voimistanut ilmaston lämpenemistä sekä elinympäristöjen köyhtymistä. Hallitustenvälinen biodiversiteetti- ja ekosysteempipaneeli (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* IPBES) on globaalissa luonnon monimuotoisuuden ja ekosysteemipalveluiden tilan selvityksessä arvioinut, että luonnon monimuotoisuus uhkaa kadota ennennäkemättömän nopealla tahdilla (IPBES 2019). Selvityksen mukaan ilmastonmuutos on suora muutostekijä (*driver*), joka voimistaa myös muiden muutostekijöiden, kuten maankäytön ja vieraslajien, haitallisia vaikutuksia luontoon. Näiden yhdysvaikutusten takia on korostettu, että luonnon köyhtymistä ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia tulisi tarkastella samanaikaisesti. Lisäksi suojelualuesuunnittelussa olisi huomioitava, että ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan joka tapauksessa kymmeniä vuosia, vaikka kasvihuonepäästöt saataisiinkin vähenemään nykyisestä.

On kuitenkin ilmeistä, että luonnonsuojelualueet säilyvät suojelusuunnittelun keskiössä myös muuttuvassa ilmastossa, sillä seurantatutkimuksien perusteella lajipopulaatioissa tapahtuneet muutokset eivät kerro suojelualueiden merkityksen voimakkaasta alenemisesta. Yksittäisten lajien taantumisesta huolimatta useat suojellisesti merkittävät lajit ovat viime vuosinakin pystyneet säilymään suojelualueilla eri puolilla maapalloa ja lisäksi suojelualueilla on havaittu olevan tärkeä sillanpääesiintymien rooli lajien leviämisessä uusille, ilmastoltaan suotuisiksi muuttuneille alueille (Gillingham ym. 2015; Thomas ja Gillingham, 2015; Thomas ym. 2012). Suojelualueilla voi olla muuttavassa ilmastossa myös keskeistä merkitystä niillä esiintyvien luontotyyppien tarjoamien ekosysteemipalveluiden kautta – jotka voivat säilyä siitä huolimatta, että suojelukohteiden lajistossa tapahtuisi muutoksia. Yksi keskeisimmistä ekosysteemipalveluista on suojelualueiden, etenkin metsäisten suojelualueiden potentiaalinen merkitys hiilen sidonnassa ja hiilen varastoinnissa, millä voi olla paikoin merkittävä rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä (Melillo ym. 2016).

Koska ilmastonmuutos joka tapauksessa vaikuttaa luonnonsuojelualueverkoston kykyyn turvata luonnon monimuotoisuutta, suojelusuunnittelussa olisi huomioitava muuttuvan ilmaston dynaamiset vaikutukset ja kehittää menetelmiä ja keinoja, joiden avulla eliölajit, luontotyypit ja elinympäristöt pystyvät sopeutumaan muutoksiin mahdollisimman hyvin. Tämä kehitystyö sisältää monenlaisia elementtejä, ulottuen suojelualueiden topografisen ja elinympäristöjen heterogeenisyyden kasvattamisen puskurivaikutuksista aina suurilmastollisten riskialueiden tunnistamiseen ja suojelualueiden ulkopuolisten alueiden maankäytön haittavaikutuksiin (Cahill ym. 2013; Garcia ym. 2014; Gillson ym. 2013; Heller ja Zavaleta, 2009; Lawler ym. 2010; Maclean ja Wilson, 2011; Suggitt ym. 2018).

Lajitasolla erityisen tärkeää on lajien ja lajipopulaatioiden ilmastollisten riskitekijöiden moniulotteinen arviointi. Näihin arviointeihin sisältyy kolme pääkriteeriä: lajien esiintymien ja populaatioiden altistuminen (*exposure*) ilmastonmuutokselle (kuinka voimakkaita muutoksia ennustetaan lajin esiintymispaikoille), lajien herkkyys (*sensitivity*) eri ilmastotekijöiden muutoksille sekä niiden sopeutumiskyky (*adaptive capacity*) muuttuvassa ilmastossa (Foden ym. 2013; Foden ym. 2019; Pacifici ym. 2015; Willis ym. 2015). Ilmastonmuutokselle herkimpien lajien elinkelpoisuus ja lisääntymiskyky alenee suhteellisen voimakkaasti jo vähäisen lämpötilan tai sademäärän muutoksen johdosta (Dawson ym. 2011). Sopeutumiskyky puolestaan ilmentää lajin kykyä mukautua ilmastonmuutoksen vaikutuksiin nykyisellä elinalueellaan, kuten lajin kykyä siirtyä suotuisampaan kohtaan samalla alueella tai levitä kokonaan uudelle eliömaantieteelliselle alueelle. Nämä kolme pääkriteeriä yhdessä määrittävät lajien ja populaatioiden haavoittuvuuden ilmastonmuutokselle (kuva 1).

Vuosina 2017-2019 Suomen ympäristökeskus toteutti yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen, Helsingin yliopiston maantieteen laitoksen ja Metsähallituksen tutkijoiden kanssa *Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa* -hankkeen (SUMI). Tämä hanke on



**Kuva 1.** Lajien ilmastomuutokselle haavoittuvuuden arvioinnissa käytetyt kolme pääkriteeriä: altistuminen (*exposure*), herkkyys (*sensitivity*) ja sopeutumiskyky (*adaptive capacity*). Samaa ilmastomuutokselle haavoittuvuuden arvioinnin lähestymistapaa voidaan soveltaa myös luontotyyppien esiintymiin.

ensimmäinen Suomessa tehty laaja-alaisempi arviointi, jossa selvitetään ilmastomuutoksen vaikutuksia maamme suojelualueverkostoon ja verkostossa esiintyviin lajeihin ja luontotyypeihin ja niiden uhkiin.

SUMI-hanke koottiin vuonna 2016 tehdyn *Suomen luonnonsuojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa* -esiselvityksen (Aapala ym. 2017) tulosten perustalle. Esiselvityksessä tunnistettiin teemaan liittyvät merkittävimmät tutkimusaiheet ja tietotarpeet, joilla suojelualueverkoston toimivuutta ja kattavuutta voidaan arvioida ilmastomuutoksen ja maankäytön aiheuttamien uhkien alla. Tämä esiselvitys ohjasi SUMI-hankkeen tavoitteita. Esiselvityksen perusteella SUMI-hanke suunniteltiin tuottamaan tietoa Suomen suojelualueverkostossa esiintyvien lajien ja luontotyyppien sopeutumiskyvystä ilmastomuutokseen sekä arvioimaan suojelualueiden ulkopuolisten alueiden maankäytöstä mahdollisesti aiheutuvia haitallisia vaikutuksia suojelualueiden populaatioille ja luontotyypeille. Tiivistetysti, hankkeen yleisluonteinen tavoite oli tarjota tutkittuun tietoon pohjautuva käsitys Suomen luonnonsuojelualueverkoston kyvystä säilyttää luonnon monimuotoisuutta muuttuvassa ilmastossa. Hankkeella oli kaksi erityistä tarkastelukulmaa, joihin kiinnitettiin tarvittaessa enemmän huomiota: EU:n luonto- ja lintudirektiivin mukaan yhteisön tärkeinä pitämät lajit ja luontodirektiivin luontotyypit, sekä metsäisten suojelualueiden merkitys hiilen sidonnassa ja hiilivarastoina.

SUMI-hanke sisälsi neljä työpakettia. Niiden yleisinä tavoitteina oli (1) tuottaa tietoa lajien ja luontotyyppien haavoittuvuudesta ilmastomuutokselle (loppuraportin luku 3), (2) selvittää suojelualueverkostoon ja siinä esiintyviin lajeihin ja luontotyypeihin kohdistuvia ilmatoriskejä eli kuinka voimakkaita ja nopeita muutoksia on odotettavissa ja minkälaisia alueellisia eroja ilmastollisissa uhkatekijöissä on (luvut 2 ja 4), (3) selvittää suojelualueverkostoon ja niiden lajeihin ja luontotyypeihin suojelualueiden ulkopuolelta kohdistuvia maankäyttöpaineita (luvut 3 ja 4), (4) käynnistää selvitys suojelualueiden merkityksestä metsien hiilivarastona ja -nieluna (luku 5). Tutkimusaineistojen rajoitteiden takia luontotyyppien ilmastollisten uhkien arviointityö sekä suojelumetsien hiilivarasto- ja hiilinielututkimus perustui etupäässä jo olemassa olevaan kirjallisuuteen, mutta näiltäkin osin hankkeessa tuotetut synteetit tuottavat arvokasta informaatiota ”ilmastoviisaan” suojelusuunnittelun kehittämiseksi. Suojelualueiden ja niiden lajipopulaatioiden ja luontotyyppien ilmastollisten

riskien arviointi toteutettiin tarkastelemalla sekä ilmastonmuutoksen voimakkuuden (*climate change velocity*) alueellisia eroja että yksittäisten suojelualueiden pienilmastollisen vaihtelun mahdollisia puskurivaikutuksia (Ackerly ym. 2010; Carroll ym. 2015; Hannah ym. 2014).

Lajitason analyysissä SUMI-hankkeessa selvitettiin etenkin sitä, miten erilaiset lajiominaisuudet, kuten lajien leviämiskyky, vaateliaisuus elinympäristön suhteen ja elinkiertoon liittyvät erilaiset strategiat, ovat mahdollisesti vaikuttaneet lajipopulaatioissa ja lajien levinneisyydessä havaittuihin muutoksiin, ja minkä suuruisia ilmastollisia uhkia voidaan lajiominaisuuksien perusteella erilaisille lajeille ennustaa. Direktiivilajien kohdalla keskityttiin lajien esiintymispaikkojen väliseen riskitasojen vertailuun. Tässä työssä tarkasteltiin esiintymien ilmastollisten ja maankäytöstä johtuvien uhkien voimakkuutta; tämän tyyppisillä vertailuilla voidaan paikantaa kaikkien uhatuimmat lajipopulaatiot suojelusuunnittelun avuksi. Eliöryhmistä erityistä huomiota kiinnitettiin lintuihin, joilla selvitettiin muun muassa suojelualueiden lintupopulaatioiden muutoksia suhteessa ilmastonmuutokseen (Virkkala ym. 2018) sekä suojelualueiden kykyä lieventää ilmastonmuutoksen kielteisiä vaikutuksia suojelullisesti merkittäviin lajeihin (Virkkala ym. 2014, 2019) ja mahdollisuuksia säilyttää lajistollinen monimuotoisuus ilmaston muuttuessa (Virkkala ym. 2019). Yksi tapaustutkimus oli selvittää suojelualueiden pienilmastollisen vaihtelun puskurointikykyä ilmastonmuutoksen kielteisiin vaikutuksiin pohjoisilla metsälintulajeilla (Virkkala ym. 2020).

Tähän loppuraporttiin on koottu SUMI-hankkeen työpakettien tuottamien selvitysten, kirjallisuuskatsausten ja tutkimusten keskeisiä tuloksia. Hankkeen tuloksia tullaan avaamaan myös yksityiskohtaisesti tapaustutkimuksiin perustuvissa tiedeellisissä julkaisuissa (Heikkinen ym. 2020, Heikkinen ym. julkaisematon; Virkkala ym. julkaisematon). Tuloksia voidaan hyödyntää paitsi ilmastoviisaan luonnonsuojelualuesuunnittelun kehittämisessä Suomessa myös uusien keskeisten luonnonsuojelubiologisten tutkimushankkeiden ja -teemojen tunnistamisessa ja kehittämisessä, joiden avulla maamme luonnon monimuotoisuuden sopeutumiskykyä ilmaston- ja maankäytönmuutosten voimistuviin vaikutuksiin voitaisiin edistää.

## Tietolaatikko

### **Havaittu ja ennustettu ilmastonmuutos Suomessa**

Ihmisen aiheuttama ilmastonmuutos on jo käynnissä. Vuoden keskilämpötila on noussut 1850-luvun ja 2010-luvun välillä Suomessa keskimäärin noin 2,5 °C (Mikkonen ym. 2015; Ilmasto-opas 2019a). Talvikuukaudet ovat lämmenneet eniten, noin 5 astetta 1850-luvun jälkeen (Mikkonen ym. 2015). Talvilämpötilojen noustessa myös maaperän routaantuminen vähenee (Jylhä ym. 2012). Suomen ilmasto tulee muuttumaan vielä voimakkaammin lähivuosikymmeninä (Ruosteenoja ym. 2016a). Lämpötilojen arvioidaan nousevan Suomessa 1,5–2 kertaa nopeammin kuin maapallolla keskimäärin. Ilmaston lämmitessä myös vuotuisen sademäärän on ennustettu lisääntyvän Suomessa 8–20 %. Ilmaston lämpeneminen pidentää myös kasvukautta ja kasvattaa lämpösomaa. Vuotuiset lämpösummat ovat nousseet Suomessa erityisesti 1990-luvun puolivälin jälkeen (Lehtonen & Pirinen 2019). Kuluva vuosisadan lopulle ennustettuja olosuhteita, korkeiden lämpösummien ja pitkän päivän yhdistelmää, ei tavata tällä hetkellä missään maapallolla (Ruosteenoja ym. 2016b). Toteutuessaan näillä muutoksilla on erittäin huomattavia vaikutuksia eliölajien ja luontotyyppien esiintymiseen Suomessa.

### **Havaitut ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen luonnossa**

Viimeisen kolmen vuosikymmenen aikana tapahtunut lämpeneminen on jo aiheuttanut laajamittaisia muutoksia Suomen luonnossa. Kasvillisuuden perustuotanto on lisääntynyt laajalti pohjoisilla alueilla. Monet eteläistä alkuperää olevat lajit ovat runsastuneet voimakkaasti ja niiden levinneisyyden painopisteet ja pohjoisreunat ovat siirtyneet kohti pohjoista (Pöyry ym. 2009; Virkkala & Lehikoinen 2017). Vastaavasti moni levinneisyydeltään pohjoinen laji on vähentynyt ja vetäytynyt Etelä-Suomesta (Virkkala & Lehikoinen 2017; Leinonen ym. 2017). Lajien esiintymisen runsaussuhteissa tapahtuneet muutokset heijastuvat myös lajiyhteisöjen koostumuksiin, esimerkkinä yöperhosyhteisöjen lounaistuminen (Leinonen ym. 2016). Myös fenologiassa eli biologisten ilmiöiden ajoittumisessa on havaittu huomattavia muutoksia. Esimerkkejä näistä ovat kasvillisuuden aiempaa aikaisempi kehittyminen (Holopainen ym. 2013), lintujen kevätmuuton aikaistuminen (Jonzén ym. 2006) ja perhosten monisukupolvisuuden yleistyminen (Leinonen ym. 2016).

### **Ennustetut ilmastonmuutokset vaikutukset Suomen luonnossa**

Lajien levinneisyyksien muutosten odotetaan edelleen voimistuvan Suomessa ilmastonmuutoksen edetessä (Tuomenvirta ym. 2018). Nämä ennusteet perustuvat erityisesti bioklimaatisten mallien avulla tuotettuihin ennusteisiin (Heikkinen ym. 2006). Pohjoinen, viileään ilmastoon sopeutunut lajisto vähenee, ja vaarana on, että se häviää suureksi osaksi Suomesta. Vastaavasti eteläinen lajisto runsastuu ja osin korvaa aiemman viileämpään ilmastoon sopeutuneen lajiston.

Lajien kyky siirtyä lämpenevän ilmaston mukana riippuu niiden ominaisuuksista, kuten liikkumiskyvystä, sekä lajeille sopivien elinympäristöjen määrästä ja alueellisesta tiheydestä. Esimerkiksi kasvit luultavasti reagoivat ilmastonmuutokseen huomattavasti hitaammin kuin eläimet rajoittuneemman leviämiskykynsä takia. Viileälle ilmastolle tyyppilliset elinympäristöt, kuten lumesta ja jäädästä riippuvaiset tunturielinympäristöt ja palsasuot, ovat erityisen haavoittuvia (Luoto ym. 2004). Tällaiset elinympäristöt voivat kadota Suomesta kokonaan tai lähes kokonaan kuluva vuosisadan loppuun mennessä. Erityisesti niukkaravinteisissa ja viileissä elinympäristöissä elävien uhanalaisten lajien menestyminen heikkenee entisestään. Näille lajeille lisäpainetta aiheuttavat vieraslajit, joiden on ennustettu hyötyvän ilmastonmuutoksesta enemmän suhteessa alkuperäiseen lajistoon (Heikkinen ym. 2012).

## 2 Ilmastonmuutoksen nopeus ja luonnonsuojelusuunnittelu

*Luonnonsuojelualueiden ja lajipopulaatioiden haavoittuvuutta ilmastonmuutokselle voidaan arvioida ilmastotekijöiden muutosnopeuden (climate change velocity) perusteella. SUMI-hankkeessa selvitettiin kolmen keskeisen ilmastotekijän, lämpösomman, tammi-kuun keskilämpötilan ja vesitaseen, muutosnopeutta Suomen Natura 2000 -verkoston alueilla. Selvitys perustui Manner-Suomen nykyistä ja tulevaisuuden pienilmastoa kuvaavaan mallinnusaineistoon, jonka avulla arvioitiin Natura 2000 -alueiden pienilmaston muutoksia. Tulosten perusteella ilmastotekijöiden muutosnopeuksissa on merkittäviä alueellisia eroja ja Natura 2000 -alueiden pienilmaston muutokset tulevat olemaan etenkin loivapiirteisillä seuduilla huomattavan suuria.*

Altistuminen (*exposure*) on yksi kolmesta keskeisestä luonnonsuojelusuunnittelussa käytetyistä kriteereistä, kun arvioidaan lajien, luontotyyppien tai luonnonsuojelualueiden haavoittuvuutta (*vulnerability*; ks. luvut 1 ja 3) ilmastonmuutoksen vaikutuksille (Case ym. 2015; Stagl ym. 2015). Altistuminen ilmastonmuutokselle ilmentää sitä, kuinka voimakkaita ja laajoja muutoksia lajien tai elinympäristöjen suotuisiin alueisiin, niiden määrään ja sijaintiin, on ilmastoskenaarioiden ennusteiden perusteella odotettavissa tulevaisuudessa.

Tieto ilmastonmuutoksen vaikutusten alueellisesta vaihtelusta voi merkittävästi auttaa suojelualueverkoston suunnittelua. Sen avulla voidaan arvioida, miten ilmastolliset riskit jakaantuvat suojelualueverkoston eri osiin, mitkä alueet ja populaatiot ovat kaikkein alttiimpia ilmastonmuutokselle, ja minne suojelualueiden ja lajien hoitotoimia tulisi kohdentaa (Ackerly ym. 2010; Wiens ym. 2011; Carroll ym. 2015; Batllori ym. 2017; Belote ym. 2018; Brito-Morales ym. 2018). Suojelualueiden ja paikallisten lajipopulaatioiden altistumista ilmastonmuutokselle on viime vuosina arvioitu etenkin ilmastonmuutoksen nopeutta (*climate change velocity*) kuvaavien indeksien avulla. Nämä indeksit mittaavat sitä, miten nopeasti ja mihin suuntaan ilmaston ennustetaan muuttuvan tarkasteltavan alueen eri osissa (Ackerly ym. 2010; Brito-Morales ym. 2018). Sillä, kuinka nopeasti ilmasto muuttuu, on keskeinen merkitys, kun arvioidaan suojelualueverkoston yksittäisten alueiden ja niillä esiintyvien luontotyyppien ja lajien sopeutumismahdollisuuksia.

Aiemmat ilmastonmuutoksen nopeuden tutkimukset ovat vaihdelleet alue- ja maakohtaisista tarkasteluista (Ackerly ym. 2010; Barber ym. 2016; Kosanic ym. 2019) mantereen laajuisiin (Carroll ym. 2015; Batllori ym. 2017) ja globaaleihin selvityksiin (Loarie ym. 2009; Burrows ym. 2011; Burrows ym. 2014). Suurin osa aihepiirin tutkimuksista käsittelee laajojen alueiden yleisluonteisia eroja, ja vain harvoin on arvioitu missä määrin tietyn suojelualueverkoston eri osat (Ackerly ym. 2010; Batllori ym. 2017) tai suojelullisesti merkittävien lajien paikalliset esiintymät (Barber ym. 2016) altistuvat ilmastonmuutokselle.



## Ilmastonmuutoksen nopeusindeksin laskeminen ja käyttö

Ilmastonmuutoksen nopeus on yleisluonteinen indeksi, jonka laskeminen perustuu yksinomaan ilmastollisiin tekijöihin, mutta joka silti tarjoaa ekologisesti merkittävää tietoa ilmastoviisaaseen luonnonsuojelusuunnitteluun (Ackerly ym. 2010; Hamann ym. 2015; Brito-Morales ym. 2018). Vaikka ilmastonmuutoksen nopeuden laskemisessa ei käytetä lajeihin liittyviä tietoja, muutosindeksin tiedot voidaan kytkeä lajien suojelubiologiaan ja suojelualueiden ilmastollisten riskien tarkasteluihin. Ilmastonmuutoksen nopeusarviot auttavat tunnistamaan alueita, joissa voimakas muutos aiheuttaa merkittäviä riskejä lajipopulaatioiden elinvoimaisuudelle ja eliöyhteisöjen rakenteellisten, toiminnallisten ja ekologisten piirteiden säilymiselle (Hamann ym. 2015; Batllori ym. 2017). Yhteisötason vaikutukset voivat olla merkittäviä etenkin, jos ilmastonmuutos vaikuttaa kriittisesti eliöyhteisöjen avainlajien (*keystone species*) menestymiseen (Ackerly ym. 2010). Ilmastonmuutoksen nopeustiedot kertovat myös siitä, millä alueilla suojelualueverkoston täydentäminen uusilla askelkivi-tyyppisillä (*stepping stone*) suojelukohteilla auttaisi lajeja siirtymään uusille alueille. Toisaalta analyysit voivat auttaa tunnistamaan (suojelu)alueita, joissa ennustettu muutos on hitaampaa ja missä lajipopulaatiot voivat siten säilyä pidempään (Hannah ym. 2014; Belote ym. 2018; Brito-Morales ym. 2018).

Ilmastonmuutoksen nopeutta on arvioitu kahdella eri tavalla. Ensimmäinen menetelmä on Loarien ja kumpaneiden (2009) artikkelissa esittelemä laskentakaava 'paikalliselle ilmastonmuutoksen nopeudelle' (*local climate velocity*), jossa tietylle paikalle ennustettu ilmaston lämpeneminen suhteutetaan saman ilmastotekijän nykyiseen vaihtelevuuteen lähiympäristössä (Brito-Morales ym. 2018). Toinen, niin kutsuttu ilmastoanalogia-menetelmä (*climate-analog velocity*), perustuu nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa samankaltaisten paikkojen välisten etäisyyden laskentaan. SUMI-hankkeessa käytettiin jälkimmäistä lähestymistapaa.

Aiemmat ilmastonmuutoksen nopeuden tutkimukset ovat usein tarkastelleet vain yhden ilmastotekijän, etenkin vuoden keskilämpötilan, muutosnopeutta, minkä vuoksi ne antavat suppean käsityksen ilmaston eri piirteisiin liittyvistä riskeistä (Dobrowski ym. 2013; VanDerWal ym. 2013; Ordonez ym. 2014). Useita ilmastomuuttujia sisältäneissä töissä muuttujat on tavallisesti tiivistetty ilmastogradienteiksi (Hamann ym. 2015; Belote ym. 2018), joista yksittäisiin ilmastotekijöihin liittyvät muutokset ovat hankalat eritellä (Wiens ym. 2011; Brito-Morales ym. 2018). Useamman yksittäisen ilmastotekijän muutosnopeuksia ja niiden tuottamia uhkia on siten harvoin tarkasteltu rinnakkain eri alueilla tai suojelualueverkostossa (Dobrowski ym. 2013; Ordonez ym. 2014). SUMI-hankkeessa käytettiin kolmea yksittäistä, pohjoisille ekosysteemeille keskeistä ilmastomuuttujaa, jotka tarjoavat suojelualueiden tarkasteluun monipuolista informaatiota erityyppisistä ilmastollisista riskeistä (VanDerWal ym. 2013).

Myös pienilmaston muutosnopeuksia on aiemmissa töissä selvitetty heikosti. Tutkimus on perustunut valtaosin mesoilmaston (pikselimuotoisen aineiston resoluutio 1–100 km) tai suurilmaston (resoluutio > 100 km) mittakaavan ilmastoaineistoihin, eikä yksikään suojelualueiden tarkastelu ole selvittänyt paikallisen pienilmaston (resoluutio noin 50 - 1000 m) merkitystä ilmastomuuttujien muutosnopeuksiin (Ackerly ym. 2010; Hamann ym. 2015). Pienilmaston huomiotta jättäminen voi johtaa korkokovaltaan voimakkaasti vaihtelevilla alueilla, kuten Lapissa, vinoutuneisiin muutosnopeuksien – ja sitä kautta ilmastoriskien – arvioihin (Ackerly ym. 2010; Dobrowski ym. 2013). Lisäksi pienilmastoltaan poikkeavien, mahdollisten ilmasto-refugoiden eli lajiston suojapaikkojen, tunnistaminen onnistuu karkean resoluution ilmastoaineistoista heikosti (Dobrowski, 2011; Hannah ym. 2014; Lenoir ym. 2017).

Myös suojelualueiden nykyisen ja tulevaisuuden ilmastollisen vaihtelun päällekkäisyyden analysointi onnistuu paremmin tarkan resoluution pienilmastoaineiston avulla.

## 2.2

### **Ilmastonmuutoksen nopeus Suomessa ja Natura 2000 -verkostossa**

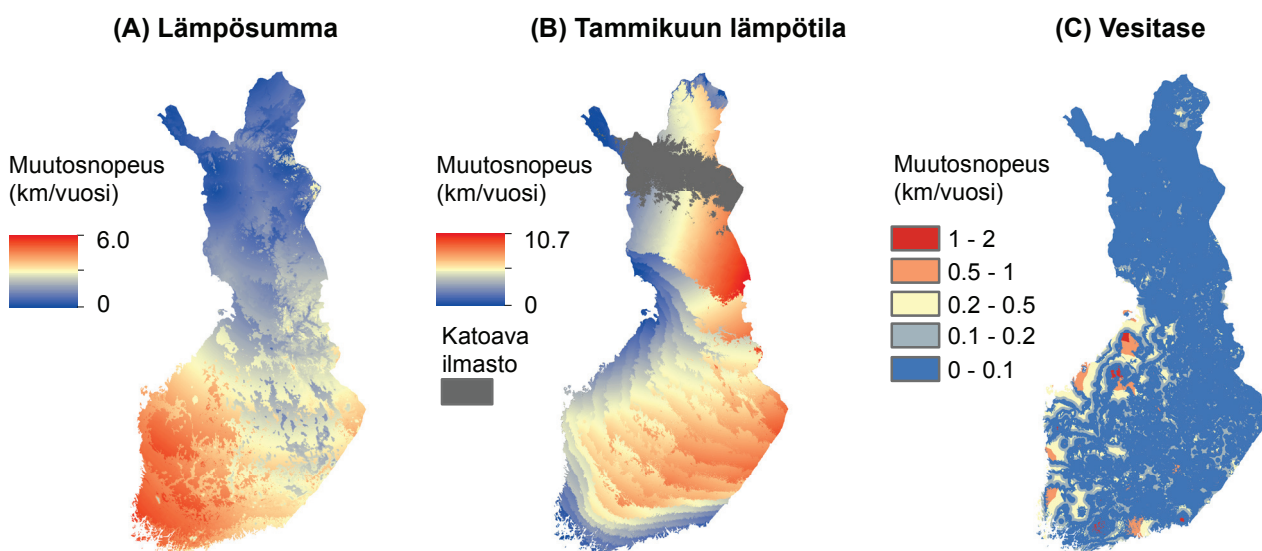
SUMI-hankkeessa ilmastonmuutoksen nopeuden vaihtelua ja alueiden altistumista ilmastonmuutokselle selvitettiin Manner-Suomen Natura 2000 -verkoston alueilla. Arvioinnissa analysoitiin kolmen ilmastomuuttujan, kasvukauden aikaisen lämpösumman (*growing degree days*), tammikuun keskilämpötilan ja vuosittaisen vesitaseen (*water balance*; sademäärän suhde haihduntaan) (Sykes ym. 1996; Hill ym. 2003; Huntley ym. 2008; Dobrowski ym. 2013) pienilmastotason muutosnopeuksia ja suojelualueiden sisäistä vaihtelua. Valitut kolme ilmastomuuttujaa ilmentävät ekologisesti erilaisia, sekä talvi- että kasvukauden lämpöolojen ja elinympäristöjen vesitasetilanteen muutoksia, ja siten erityyppisiä ilmastollisia riskejä lajiston ja luontotyyppien säilymiselle (vrt. VanDerWal ym. 2013).

Työssä mallinnettiin vuosille 1981–2010 kuukausittaiset lämpötila- ja sademäärätiedot Manner-Suomeen sekä Suomen lähialueille Ruotsiin, Norjaan ja Venäjälle 50 x 50 metrin ruudukolla, ja näiden avulla laskettiin jokaiselle ruudulle lämpösumma- ja vesitasearvot (ks. kappale *Lisätietoja menetelmistä*). Vuosille 2070–2099 tuotettiin skenaarioiden RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5 (Taylor ym. 2012) mukainen ilmastoaineisto samalla ruudukolle. Ilmastonmuutoksen nopeus laskettiin kaikille kolmelle ilmastotekijälle ja kaikille 50 x 50 metrin ruuduille ilmastoanalogia-menetelmällä (Brito-Morales ym. 2018). Saatujen ilmastonmuutoksen nopeustietojen tulkinta on suoraviivaista; mitä kauempaan pienilmastoltaan samankaltainen ruutu tulevaisuudessa sijaitsee, sitä suurempi on muutosnopeus ja sitä voimakkaampaa altistuminen ilmastonmuutoksen vaikutuksille.

Tulosten perusteella kolmen ilmastotekijän muutosnopeudet poikkeavat selvästi toisistaan Suomen eri osissa (kuva 2). Vesitaseen muutosnopeus on alhaisempi kuin lämpösumman ja tammikuun lämpötilan muutosnopeus, ja jää RCP4.5 -skenaarioon perustuvissa arvioissa aina alle 3 kilometriin per vuosi. Lisäksi vesitaseen muutosnopeus vaihtelee alueellisesti erikoisesti, sillä se sisältää yksittäisiä nopeamman muutoksen alueita rannikkoseuduilla, kun taas Suomen keski- ja itäosat ovat hitaan muutosnopeuden aluetta. Sekä lämpösumman että tammikuun keskilämpötilan nykyisiä olosuhteita vastaavat alueet siirtyvät tulevaisuudessa keskimäärin kauemmaksi kuin vesitaseen analogiset alueet. Tietyt osat Suomea ovatkin lämpösumman ja tammikuun keskilämpötilan näkökulmasta huomattavan haavoittuvia ilmastonmuutoksen vaikutuksille.

Näiden kahden muuttujan välillä on kuitenkin tärkeitä eroja: lämpösumman suurimmat muutosnopeuden alueet sijaitsevat Lounais-Suomessa, kun taas tammikuun lämpötilan suurimmat muutokset keskittyvät Itä-Suomeen ja etenkin Lappiin. Lämpösumman osalta tämä ero liittyy Suomen korkokuvan alueelliseen vaihteluun. Lounais- ja Länsi-Suomi kuuluvat loivapiirteisen korkokuvan suuralueeseen, jossa lämpösumman muutosnopeudet ovat suurempia kuin topografialtaan vaihtelevassa Pohjois-Suomessa. Toisin sanoen, Suomen lounais- ja länsirannikolla kesälämpötilojen ilmastollisesti samankaltaiset alueet siirtyvät tulevaisuudessa selvästi kauemmaksi kuin Pohjois-Suomessa. Toinen merkittävä ero on, että siinä missä lämpösumman nykyisille arvoille löytyy tulevaisuudessa vastaavia arvoja joko Suomesta tai Ruotsin ja Norjan tunturialueilta, nykyisille tammikuun kylmimmille olosuhteille ei RCP4.5 -skenaarion mukaisessa ilmastossa enää löydy samanlaisia oloja edes

Suomen lähialueilta. Nykyisenkaltaiset Metsä-Lapin kylmää talvi-ilmastoa vastaavat olosuhteet saattavat siten tulevaisuudessa löytyä vasta useiden satojen kilometrien päästä idästä, Siperian pohjoisosista.



**Kuva 2.** Kolmelle ilmastotekijälle lasketut ilmastonmuutosnopeudet (*climate change velocity*) Manner-Suomessa: (A) lämpösomma, (B) tammikuun keskilämpötila ja (C) vesitase. Muutosnopeudet on laskettu vertaamalla 'nykyistä' (1981–2010) ilmasto ja tulevaisuuden ennustettua (RCP 4.5 vuosille 2070–2099) ilmasto 50 x 50 metrin ruudukossa, käyttämällä ilmastoanalogiaan perustuvaa laskentatapaa (*climate-analog velocity*). Indeksit ilmentävät sitä, kuinka nopeasti ja kauas nykyilmaston olosuhteet siirtyvät uusille alueille.

Lämpösomman ja tammikuun lämpötilan muutosnopeuksien vastakkaisuus näkyy myös yksittäisten suojelalueiden altistumisessa ilmastonmuutokselle. Työssä tunnistettiin lämpösomman, tammikuun lämpötilan ja vesitaseen osalta erikseen ne Natura 2000 -kohteet, joilla kyseisen ilmastotekijän muutosnopeudet ovat korkeimmillaan (korkein 5 % eli 253 Natura 2000 -kohdetta kaikista 5068 kohteesta). Tämä tarkastelu osoitti, että lämpösomman ja tammikuun lämpötilan suhteen korkeimman muutosnopeuden luonnehtimien Natura-kohteiden joukossa ei ole yhtään samaa kohdetta. Vesitaseen ja lämpösomman suhteen voimakkaimman muutosnopeuden Natura 2000 -kohteet ovat samoja 12,6 % tapauksista. Ilmastoskenaarioiden välillä voimakkaimpien muutosalueiden tarkastelussa ei ole eroja, vaan skenaarioiden RCP2.6 ja RCP8.5 tulokset ovat samanlaisia kuin skenaarion RCP4.5. Ennustetut muutosnopeudet toki ovat lievempiä RCP2.6 skenaariossa ja suurempia RCP8.5 skenaariossa (Heikkinen ym. 2020).

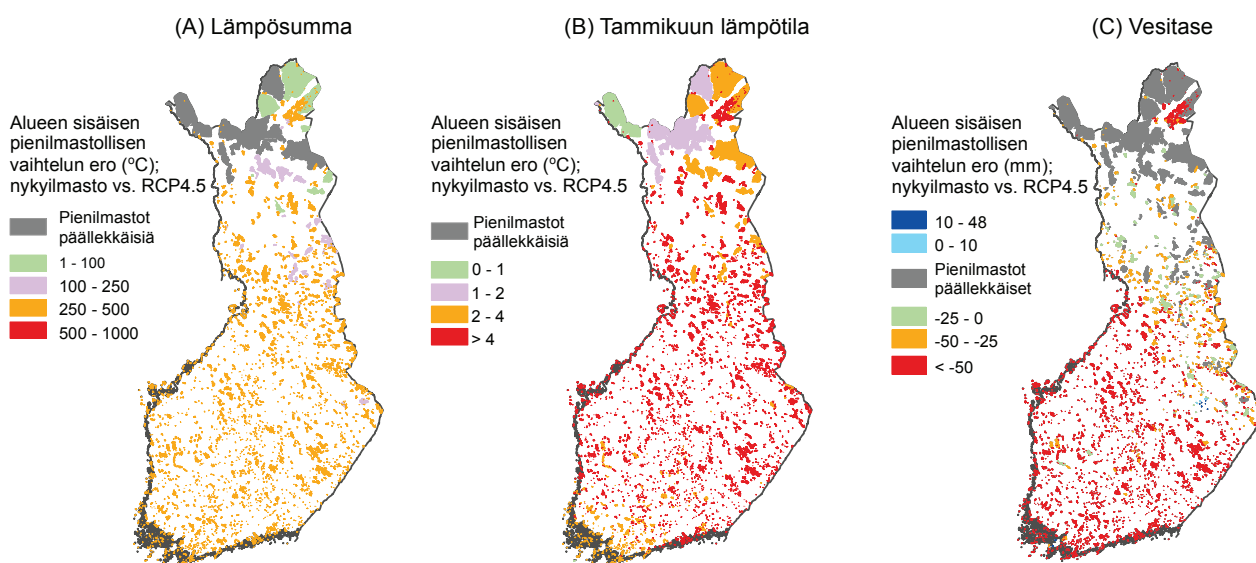
### 2.3

## Pienilmaston vaihtelu Natura 2000 -alueilla nyt ja tulevaisuudessa

SUMI-hankkeen tuottama 50 x 50 metrin resoluution pienilmastodata mahdollistaa suojelalueiden ilmaston muuttumisen tarkastelun tarkemmin kuin aiemmissa tutkimuksissa käytetyt aineistot. Kun vertaillaan kolmen ilmastomuuttujan vaihtelua Natura 2000 -verkoston suojelukohteella vuosina 1981–2010 ja 2070–2099 (skenaario RCP4.5), vesitaseen ennustetut muutokset poikkeavat jälleen lämpösomman ja tam-

mikuun lämpötilan ennusteista (kuva 3). Yli kolmella sadalla Natura 2000 -kohteella vesitaseen vaihtelu nykyilmastossa ja tulevaisuudessa on päällekkäistä mikä ilmentää suhteellisen lievää muutosta. Toisaalta suurella osalla Natura 2000 -kohteista vesitaseen olosuhteet muuttuvat täysin, ja useimmiten nämä alueet muuttuvat ilmastollisesti kuivempaan suuntaan (kuva 3C). Toisin sanoen, näillä alueilla sademäärän kasvun merkitys kumoutuu ilmaston lämpenemisen takia.

Lämpösumman ja tammikuun lämpötilan osalta ennustetut muutokset ovat voimakkaita. Lämpösumman suhteen Natura-alueiden sisäinen vaihtelu nykytilanteessa ja tulevaisuudessa on päällekkäistä vain seitsemällä, korkokuvaaltaan huomattavasti vaihtelevalla alueella. Tammikuun lämpötilan ennusteet ovat vielä dramaattisempia, sillä Natura-alueiden nykyiset talviolosuhteet näyttävät vaihtuvan täydellisesti ilmaston lämpenemisen myötä kaikilla Natura-alueilla.



**Kuva 3.** Pienilmaston (50 m resoluutio) vaihtelun päällekkäisyys 5068 Natura 2000 -verkostoon kuuluvalla kohteella (minimikoko 2 hehtaaria) nykyilmastossa (1981-2010) ja vuosisadan lopulla (2070-2099) RCP4.5 ilmastoskenaarion mukaisissa olosuhteissa. (A) Lämpösumman, (B) tammikuun keskilämpötilan ja (C) vuotuisen vesitaseen Natura-alueen sisäisen vaihtelun päällekkäisyys / erotus. Erotus on laskettu seuraavasti: (A) ja (B) Natura-alueen sisäisen lämpösumman / tammikuun lämpötilan vaihtelun alin arvo tulevaisuudessa miinus lämpösumman / tammikuun lämpötilan vaihtelun ylin arvo nykyilmastossa; (C) Natura-alueen sisäisen vesitaseen vaihtelun tulevaisuuden alin arvo miinus nykyilmaston ylin, sininen ilmaisee vesitaseen kasvua (kosteuden lisääntymistä), punainen laskua (lisääntyvän haihdunnan aiheuttamaa kuivumista) Lämpösumma = kasvukauden vuorokausien keskilämpötilojen kynnysarvon (+5°C) ylittävien osien summa.

## 2.4

### Ilmastonmuutoksen nopeus ja suojelualuesuunnittelu

SUMI-hankkeen tulokset täydentävät aiempia ilmastoviiasta luonnonsuojelualuesuunnittelua käsitteleviä töitä (Dawson ym. 2011; Tingley ym. 2014; Nadeau ym. 2015; Thomas & Gillingham, 2015). Joidenkin aiempien tutkimusten perusteella yksittäisten ilmastomuuttujien muutosnopeuksien välillä saattaa olla merkittäviä eroja eri vuodenaikojen olosuhteiden välillä tai lämpötila- ja sademäärämuuttujien välillä (Dobrowski ym. 2013; VanDerWal ym. 2013; Brito-Morales ym. 2018). SUMI-hankkeen pienilmastoaineistoihin perustuvat tulokset ovat vahvasti samansuuntaisia; tuloksissa näkyvät voimakkaat alueelliset erot kesän olosuhteita kuvaavan lämpösumman ja tammikuun lämpötilan muutosnopeuksien välillä (kuva 2). Siten Suomen eri osissa sijaitsevien suojelualueiden ilmastolliset uhkatekijät voivat erota huomattavasti toi-

sistaan. Tämä tieto voidaan kytkeä tarkasteltavalla alueella esiintyvien lajien ekologiin ja ilmastollisiin vaatimuksiin. Suojelualueiden suunnittelu- ja hoitotoimissa keskeinen huomio tulee kiinnittää lajeihin, joilla populaatioiden menestyminen liittyy nimenomaan niihin ilmastotekijöihin, joiden ennustettu muutosnopeus on suurin.

Ennusteiden mukaan Suomen suojelualueverkosto tulee pienilmastollisten lämpötilojen osalta kokemaan voimakkaan muutoksen. Ainoastaan Tunturi-Lapissa sijaitsevien Natura 2000 -alueiden korkeusvaihtelu on niin laajaa, että nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmastotilan välillä on joitakin päällekkäisyyksiä. Siten eliölajistolla saattaa olla suuria vaikeuksia sopeutua ennustettuun lämpenemiseen, etenkin jos niiden fysiologinen sopeutumiskyky lämpötilan muutoksiin on rajoittunut (Pacifiçi ym. 2015; Foden ym. 2019). Täydentävillä selvityksillä on mahdollista tarkentaa yksittäisillä suojelualueilla sijaitsevien lajipopulaatioiden ilmastollisia uhkatekijöitä ja niiden tulevaisuuden kehitystä, muun muassa arvioimalla suojelualueiden pienilmaston muuttumista kautta koko kuluvan vuosisadan nyt käytetyn yhden ilmastollisen vertailupisteen (vuosijakso 2070–2099) sijaan. Tämänlainen ilmastotrendien analyysi antaisi lisätietoa siitä, missä vaiheessa paikallisen ilmaston muuttumisessa tulee sellaisia kynnystilanteita (*tipping points*), että lajipopulaatioiden säilyminen alkaa olla haasteellista. SUMI-hankkeen tulosten yleinen johtopäätös joka tapauksessa on, että suojelualue-suunnittelussa tulee painottaa suojelu- ja hoitotoimien joustavaa suunnittelua sekä varautua mittaviin olosuhteiden muutoksiin, etenkin loivapiirteisessä maisemassa sijaitsevilla suojelualueilla.

## 2.5

### Lisätietoja menetelmästä

Sääasemilta (n = 313) kerättyjen, vuosille 1981–2010 keskiarvoistettujen ilmastoaineistojen perusteella mallinnettiin kuukausittaiset lämpötila- ja sademäärätiedot Manner-Suomeen sekä Ruotsin ja Norjan pohjoisosiin ja 100 kilometriä Venäjän puolelle ulottuvalle puskurialueelle. Mallinnus tehtiin koko tälle alueelle 50 x 50 metrin ruudukossa käyttämällä Aallon ym. (2017) käyttämää mallinnustapaa. Näin tuotettu, yli 50 miljoonaa 50 x 50 metrin ruutua kattava pienilmastoaineisto antoi arvioinnin lähtökohdan: kuukausittaiset pienilmastotason lämpötila- ja sademäärätiedot 'nykyilmastossa' (1981–2010). Tietojen perusteella laskettiin lämpösomma ja vesitasearvot kirjallisuudessa käytetyillä standardimenetelmillä (Skov & Svenning, 2004; Araújo & Luoto, 2007). Tammikuun lämpötilan osalta ilmastoaineistoa täydennettiin vielä karkean mittakaavan aineistolla, joka ulottui pidemmälle itään Venäjän puolelle (E-obs ilmastoaineisto, versio 17.0, resoluutio 25 km x 25 km). Tulevaisuuden ilmastoaineisto tuotettiin lisäämällä 23 globaalin ilmastomallin yhdistelmän lämpötila- ja sademääräennusteet 1981–2010 pienilmastoaineistoon. Tuloksena syntyneet aineistot kuvaavat ilmastotekijöiden arvioituja muutoksia vuosille 2070–2099 skenaarioiden RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5 perusteella (Taylor ym. 2012).

Ilmastomuutoksen nopeus laskettiin kolmelle ilmastotekijälle ja kaikille 50 x 50 metrin ruuduille ilmastoanalogia-menetelmällä (Hamann ym. 2015; Batllori ym. 2017; Brito-Morales ym. 2018). Laskennassa jokaiselle ilmastomuuttujalle tehtiin ensiksi niiden koko vaihtelun kattava luokittelu, jonka perusteella kaikki nykyilmastoon tai tulevaisuuden ilmastoon kuuluvat 50 x 50 m ruudut laitettiin omiin luokkiinsa. Luokiteltujen ilmastopintojen avulla laskettiin jokaiselle ruudulle tieto siitä, kuinka kaukana tulevaisuuden ilmastossa lämpösommaltaan, tammikuun lämpöoloiltaan tai vesitaseeltaan lähin samanlainen ruutu sijaitsee, ja tämä etäisyys jaettiin vuosien 1981–2010 ja 2070–2099 erotuksella. Ilmasto-oloiltaan samankaltaisten ruutujen etsintä ulotettiin Suomen rajojen ulkopuolelle.



## 3 Lajien ominaisuudet ja haavoittuvuus ilmastonmuutokselle

*SUMI-hankkeessa tarkasteltiin lajien ominaisuuksien yhteyttä niiden haavoittuvuuteen ilmastonmuutokselle. Tulosten perusteella ilmastonmuutoksen negatiiviset vaikutukset korostuvat eritoten pohjoisen viileisiin oloihin, kuten tunturi- ja suoelinympäristöihin erikoistuneilla lajeilla, joiden levittäytymiskyky on rajoittunut. Eri eliöryhmissä nousi esille myös muita lajien haavoittuvuutta ilmastonmuutokselle heijastelevia ominaisuuksia, joita on tärkeää huomioida lajien hoito- ja suojelusuunnittelussa. Lajien ominaisuuksien perusteella voitiin tunnistaa ilmastonmuutokselle haavoittuvimpia lajeja, ja näitä tuloksi-avoidaan hyödyntää päätettäessä suojelutoimien kohdentamisesta.*

*Lintulajien levinneisyydessä havaitut muutokset vastaavat hyvin ennustettuja muutoksia, ja ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat nähtävissä myös suojelullisesti merkittäväillä lintulajeilla. Linnuston monimuotoisuuden säilyttämisen suhteen päätökset suojelualueverkostosta ja eri suojelualueohjelmista on tehty ilmastonmuutoksen kannalta aikanaan oikeansuuntaisesti. Etelä- ja Keski-Suomessa (etelä- ja keskiboreaalaisella vyöhykkeellä) metsien suojelualueverkosto on kuitenkin riittämätön turvaamaan lintulajiston monimuotoisuuden säilymisen ja lajien siirtymisen pohjoista kohti.*

*Suojelun kannalta merkittävien lajien, kuten EU:n luontodirektiivin liitteiden lajien, välillä havaittiin SUMI-hankkeessa selviä eroja lajien keskimääräisessä altistumisessa lämpösunnan ja tammikuun lämpötilan muutosnopeuteen, kuten myös lajeille suotuisien ja sopimattomien elinympäristöjen ja maankäytön määrässä esiintymien ympäristössä. Erot saman lajin eri esiintymien välillä altistumisessa ilmastonmuutokselle sekä haitallisen maankäytön määrässä olivat usein huomattavia, selvästi suurempia kuin lajien väliset erot, mikä tulee ottaa huomioon ilmastoviisaassa suojelusuunnittelussa.*

### 3.1

#### Lajien haavoittuvuus ilmastonmuutoksen vaikutuksille

Mikä tekee tietyistä lajeista haavoittuvampia kuin toisista? Lajien haavoittuvuuden arvioinnissa käytetyt kriteerit on usein ryhmitelty kolmeen pääkategoriaan: (1) lajien altistuminen (*exposure*) ilmastonmuutokselle, (2) lajien herkkyys (*sensitivity*) ja (3) niiden sopeutumiskyky (*adaptive capacity*) (Dawson ym. 2011). Lajien altistuminen (*exposure*) ilmastonmuutokselle tarkoittaa sitä, kuinka laajalti lajeille suotuisten alueiden määrä ja sijainti tulevat ennusteiden mukaan muuttumaan. Altistumista ilmastonmuutokselle voi arvioida esimerkiksi lajeille tehtävien bioklimaattisten levinneisyysmallien avulla. Lajien herkkyys (*sensitivity*) ilmastonmuutokselle ilmentää sitä, kuinka voimakkaasti lajin, paikallispopulaation tai yksilöiden hengissä säilyminen, elinvoimaisuus ja lisääntyminen riippuvat vallitsevista ilmasto-oloista. Lajien herkkyyttä ilmastonmuutokselle voidaan arvioida lajien lämpötila- ja sademäärätoleranssin laajuuden, lajien ekofysiologisten sekä muiden lajiominaisuuksien avulla (esim. Pacifici ym. 2015). Lajien sopeutumiskyky (*adaptive capacity*) ilmentää lajin kykyä mukautua ilmastonmuutoksen vaikutuksiin nykyisellä elinalueellaan,



siirtymällä suotuisampaan kohtaan samalla alueella, tai leviämällä kokonaan uudelle eliömaantieteelliselle alueelle. Tämä sopeutumiskyky vaihtelee muun muassa sen mukaan, mikä on lajien ja paikallisten populaatioiden fenotyypin joustavuus (*phenotypic plasticity*; eliön fenotyypin eli ilmiön muuttuminen ympäristön vaikutuksesta). Sopeutumiskykyyn vaikuttavat myös lajin geneettinen monimuotoisuus (*genetic diversity*), joka mahdollistaa paikallispopulaatioiden muuntelun ja kehittymisen, evoluutionopeus (*evolutionary rate*) sekä lajiominaisuudet (*life history traits*), joita ovat esimerkiksi leviämisen- ja kolonisaatiokyky (*dispersal and colonization ability*) (Dawson ym. 2011).

### 3.1.1

#### Lajiominaisuuksien käyttö haavoittuvien lajien tunnistamisessa

Tässä osatyössä arvioitiin sitä, mitkä lajiominaisuudet tekevät lajeista herkkiä tai sopeutumiskyvyttömiä ilmastonmuutokselle ja tarjottiin selityksiä näille yhteyksille. Tarkastelun pääpaino oli Suomessa luonnonvaraisena esiintyvissä eliölajistossa, ja tarkasteltavia eliöryhmiä olivat linnut, kasvinsyöjähyönteiset, putkilokasvit, laho- puukovakuoriaiset ja -sienet sekä jäkälät. Kustakin eliöryhmästä pyrittiin tunnistamaan lajiominaisuuksien perusteella ilmastonmuutokselle haavoittuvimpia lajeja.

Aineistoa kerättiin pääosin Web of Science -julkaisutietokannasta. Sieltä etsittiin julkaisuja, jotka käsittelevät lajien havaittuja ja ennustettuja reaktioita ilmastonmuutokseen. Tarvittaessa hyödynnettiin myös Google ja Google scholar -hakuja. Hakusanoina käytettiin esimerkiksi "climat\* AND change AND eliöryhmän tai lajin nimi". Julkaisuja etsittiin kunkin eliöryhmän koko lajistosta, mutta erityisesti keskityttiin Suomessa esiintyviin ja EU:n luontodirektiivin lajeihin.

Mukaan otetuista julkaisuista koottiin eliöryhmittäin tietoja havaituista ja ennustetuista muutoksista lajien esiintymisessä. Jos samassa julkaisussa oli tehty useita muutosennusteita perustuen eri ilmastonmuutoskenaarioihin, aineistoon valittiin ne, jotka edustivat ns. "keskitien" skenaarioita (A1B, RCP4.5, B1, A1F1). Aineiston tilastollista käsittelyä varten lajien vasteet jaettiin kolmeen ryhmään: i) positiiviset (sopeutuvaiset lajit), ii) neutraalit (ilmastonmuutoksen suhteen indifferentit lajit) ja iii) negatiiviset (herkät lajit). Positiiviset ja negatiiviset vasteet muunnettiin testejä varten binäärisiksi muuttujiksi (*dummy variable*), eli jos esimerkiksi lajin vaste oli negatiivinen, se sai negatiivisessa luokkamuuttujassa koodin "1" ja muutoin koodin "0".

Kaikista eliöryhmistä kerättiin tietoa lajin sisällyttämisestä EU:n luonto- ja lintudirektiivien liitteisiin, uusimmasta työn aikana saatavilla olleesta uhanalaisuusluokituksesta (linnut 2015, muut lajit 2010) ja tutkimuksen tyypistä (esimerkiksi seuranta, kokeellinen, mallinnus). Tämän lisäksi lajeista kerättiin julkaisuista ja muista lähteistä lajiominaisuustietoja, jotka vaihtelivat eliöryhmittäin (taulukko 1).

**Taulukko 1.** Julkaisuista kerätyt tiedot ja lajiominaisuudet.

Eliöryhmä	Lajiominaisuus
<b>Kaikki eliöryhmät</b>	Direktiivistatus, uhanalaisuusluokitus, tutkimustyyppi (seuranta, kokeellinen, mallinnus)
<b>Linnut</b>	Muuttokäyttäytyminen, pesyekoko, sukupolven pituus, paino, levinneisyysalue, elinympäristö, populaatiokoko
<b>Perhoset</b>	Talvehtimismuoto, voltinismi (sukupolvien määrä vuodessa), siipiväli, liikkuvuus, ravintokasvin kasvumuoto, ravintokasvin tyyppitoisuus, erikoistuminen ravintokasvien käytössä, elinympäristö, elinympäristön laajuus, elinympäristön tuottavuus, levinneisyysalue, yleisyys, yleisyyden muutos
<b>Putkilokasvit</b>	Sukupolven pituus, monivuotisuus, kukinta-aika, pölytystapa, siemennellinen lisääntyminen, kaukolevintä, kasvullinen leviäminen, suhde muihin lajeihin, ilmasun joustavuus (phenotypic plasticity), geneettiset ominaisuudet, elinympäristön rajoittavat tekijät, pääluontotyyppi, lämpötilan vaikutus, kosteuden vaikutus, levinneisyysalue, esiintymisalueen koko, levinneisyysalueen koko, lisääntymiskykyisten yksilöiden määrä, käyttäytyminen esiintymisalueen reunaosissa, Suomen populaation osuus Euroopan populaation koosta, suojeltujen populaatioiden osuus (Suomessa)
<b>Lahopuukova-kuoriaiset</b>	Aikuisen ruumiin pituus, toukan kehittymisajan pituus, aikuisten esiintymisajan alku ja pituus, järeiden puiden suosiminen, puun lahoaste, puulaji, pienilmasto, levinneisyysalueen etelä-pohjoissuuntainen ulottuvuus ja sijainti.
<b>Lahopuusienet</b>	Itiön koko (pituus ja leveys), sienen itiöemän esiintymisajan pituus, riippuvuus muista sienilajeista, järeiden puiden suosiminen, puun lahoaste, puulaji, pienilmasto, levinneisyysalueen etelä-pohjoissuuntainen ulottuvuus ja sijainti.
<b>Jäkälät</b>	Kasvualusta, kasvumuoto, leväosakas (photobiont)

Lajien haavoittuvuutta ilmastonmuutokselle arvioitiin järjestämällä lajit niiden herkyyttä ja sopeutumiskykyä heijastelevien lajiominaisuuksien perusteella. Arviointi perustui niihin lajiominaisuuksiin, jotka tilastollisten mallien tulosten mukaan todennäköisimmin liittyivät negatiivisiin vasteisiin lajien esiintymisessä.

### 3.1.2

#### Lajien haavoittuvuus lajiryhmittäin

Havaittuja muutoksia käsitteleviä tutkimuksia löytyi useimmissa eliöryhmissä enemmän kuin ennusteita (taulukko 2). Vain lahopuukuoriaisista ja -sienistä ei löydetty yhtään tutkimusta havaituista muutoksista ja ennustetuista muutoksistakin vain yksi tutkimus. Putkilokasveista löytyi enemmän tutkimuksia kuin muista eliöryhmistä, mutta kasvien lajiominaisuuksien tilastollinen käsittely ei onnistunut aineiston hajanaisuuden vuoksi. Havaittuja muutoksia käsitteleviä tutkimuksia löytyi joka eliöryhmässä (pois lukien lahopuulajit) keskimäärin noin kaksi lajia kohti. Ennustettuja muutoksia käsitteleviä tutkimuksia löytyi sen sijaan vain noin yksi lajia kohti.

**Taulukko 2.** Kerätty kirjallisuus eliöryhmittäin.

Eliöryhmä	Havaitut				Ennustetut			
	Tutkimusten lkm	Lajien lkm	Havaintojen lkm	Havaintoja/ laji	Tutkimusten lkm	Lajien lkm	Havaintojen lkm	Havaintoja/ laji
Linnut	9	240	763	3.2	3	118	163	1.4
Perhoset	5	1 030	1 969	1.9	3	59	117	2.0
Lahopuukova-kuoriaiset	-	-	-	-	1	64	64	1.0
Lahopuusienet	-	-	-	-	1	64	64	1.0
Putkilokasvit	59	49	82	1.7	60	69	108	1.6
Jäkälät	13	50	71	1.4	4	29	31	1.1

Lyhenteet: lkm = lukumäärä

## Linnut

Lintujen esiintymisessä havaitut muutokset olivat todennäköisimmin positiivisia niillä lajeilla, jotka ovat pitkäikäisiä, suurikokoisia paikkalintuja, ja jotka elävät metsissä ja Suomen eteläosissa. Havaitut muutokset olivat todennäköisemmin negatiivisia lajeilla, jotka ovat lyhytikäisiä, pienikokoisia kaukomuuttajia, jotka elävät tunturiympäristössä ja Suomen pohjoisosissa. Lintujen esiintymisessä ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia lajeilla, jotka esiintyvät Etelä-Suomessa ja negatiivisia lajeilla, jotka esiintyvät koko maassa tai vain Pohjois-Suomessa.

**Haavoittuvat lintulajit:** Kaikkien tilastollisesti merkitsevien lajiominaisuuksien perusteella nousee esille kaksi lajia: lapinkirvinen (*Anthus cervinus*, EN <sup>1</sup>) ja lapinsirri (*Calidris temminckii*, EN). Kun tarkastelua laajennetaan järvi- tai kosteikkolajeilla, haavoittuvien lajien lista pitenee käsittämään myös seuraavat lajit: jänkäsirriäinen (*Calidris falcinellus*, NT), suokukko (*Calidris pugnax*, CR), keltävästäräkki (*Motacilla flava*, LC), vesipääsky (*Phalaropus lobatus*, VU), mustaviklo (*Tringa erythropus*, NT) ja liro (*Tringa glareola*, NT). Kun tarkastelua laajennetaan vielä lähimuuttajilla, listalle päätyvät pulmunen (*Plectrophenax nivalis*, VU), keräkurmitsa (*Charadrius morinellus*, VU), tylli (*Charadrius hiaticula*, LC) ja sepelrastas (*Turdus torquatus*, VU). Kun tarkasteluun lisätään kaikenkokoiset ja -ikäiset linnut, haavoittuvien lajien listalle nousee tunturikihi (*Stercorarius longicaudus*, NT). Jos tämän lisäksi huomioidaan myös lähimuuttajat, niin listalle nousevat myös suosirri (*Calidris alpina*, NT) ja alli (*Clangula hyemalis*, NT).

## Perhoset

Perhosten esiintymisessä havaitut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia lajeilla, jotka ovat pitkäikäisiä ja talvehtivat aikuisina, ovat isokokoisia, voimakkaita liikkumaan, joilla on kaksi tai useampia sukupolvia vuodessa, ja jotka ovat yleisiä. Lisäksi positiivisia esiintymisalueiden muutoksia tavattiin enemmän lajeilla, joiden levinneisyys on painottunut Etelä-Suomeen tai sitä etelämmäksi, ja jotka hyödynsivät ravintokasveinaan jäkälää, sieniä, kariketta tai kasveja, joiden ravintokasvien tyyppipitoisuus on korkea. Elinympäristövaatimusten suhteen nämä lajit suosivat tarkentamattomia metsäisiä biotoppeja, metsänreunoja, niittyjä tai sitten ne edustavat lajeja, jotka menestyvät monenlaisissa, erityisesti tuottavissa, elinympäristöissä.

<sup>1</sup> Lajien uhanalaisluokkien lyhenteet (Hyvärinen ym. 2019): LC – elinvoimainen, NT – silmälläpidettävä, VU – vaarantunut, EN – erittäin uhanalainen ja CR – äärimmäisen uhanalainen.

Perhoslajien levinneisyydessä havaitut negatiiviset muutokset olivat todennäköisimpiä lajeilla, jotka ovat pienikokoisia, harvinaisia ja vähentyneitä, esiintyvät koko Suomessa tai vain Pohjois-Suomessa. Negatiiviset muutokset olivat yleisempiä myös lajeilla, jotka talvehtivat toukkana, hyödyntävät ravintokasvina puuvartisia lajeja ja joiden ravintokasvien typpipitoisuus on matala, liikkuvuus on vähäistä ja joilla sukupolven kehitys vie vähintään yhden vuoden. Lajit esiintyvät etupäässä kallioilla ja havumetsissä, mutta myös soilla.

Perhosten esiintymisessä ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia lajeilla, jotka eivät vielä vakituisesti esiinny Suomessa tai jotka esiintyvät Etelä-Suomessa. Ennustettuja negatiivisia vasteita tavattiin etupäässä Pohjois-Suomessa esiintyvillä perhoslajeilla.

**Haavoittuvat perhoslajit:** Kaikkein haavoittuvimmiksi perhoslajeiksi määrittyvät lajiominaisuuksien perusteella seuraavat 10 laji: kuutäplä (*Cosmotriche lobulina*), metsäpohjanmittari (*Entephria caesiata*, NT), laikkuvarpumittari (*Dysstroma latefasciatum*), sahaneulasmittari (*Heterothera serraria*, NT), pohjanrengasmittari (*Elophos vittarius*, NT), puneharmoyökkönen (*Xestia alpicola*, LC), savuharmoyökkönen (*Xestia gelida*, VU), nuoliuharmoyökkönen (*Xestia rhaetica*, NT), vaaleaharmoyökkönen (*Xestia sincera*, VU) ja kirjoharmoyökkönen (*Xestia speciosa*, LC). Kyseiset kymmenen laji ovat levinneisyydeltään boreaalisen havumetsävyöhykkeen lajeja, ja niistä useimpien kannat ovat Suomessa vähentyneet selvästi viime vuosina (Leinonen ym. 2017). Uusimmassa uhanalaisarvioinnissa kahdeksan kymmenestä lajista on arvioitu uhanalaiseksi tai silmälläpidettäväksi (Hyvärinen ym. 2019).

Jos tilastollisesti merkitsevien lajiominaisuuksien lisäksi tarkastelussa huomioidaan soiset elinympäristöt, joiden määrä on vähentynyt ojitusten seurauksena varsinkin Etelä-Suomessa, tulevat mukaan seuraavat 19 laji: pikku-ukkopussikas (*Acanthopsyche atra*, LC), suomittari (*Arichanna melanaria*, LC), suohopeatäplä (*Boloria aquilonaris*, LC), rämehopeatäplä (*Boloria eunomia*, LC), muurainhopeatäplä (*Boloria freija*, NT), rahkahopeatäplä (*Boloria frigga*, NT), suoyökkönen (*Coenophila subrosea*, LC), suokeltaperhonen (*Colias palaeno*, LC), tuhkaravajalka (*Gynaephora fasscelina*, LC), rämevarpumittari (*Dysstroma infuscatum*, LC), sademittari (*Hypoxystis pluviaria*, VU), suoventokas (*Nola karelica*, VU), kirjotupsukas (*Orgyia recens*, LC), seittipussikas (*Phalacropterix graslinella*, LC), suokirjosiipi (*Pyrgus centaureae*, NT), harmohentopossukas (*Sterrhopterix standfussi*, LC), keltahopeayökkönen (*Syngrapha microgamma*, LC), valkohopeayökkönen (*Syngrapha parilis*, LC) ja juolukkasiniisi (*Vacciniina optilete*, LC).

## Putkilokasvit

Ilmastonmuutoksen jo havaittujen ja ennustettujen vaikutusten tarkastelu kasveilla oli erityisen vaikeaa. Putkilokasveista löytyi useita julkaisuja, mutta niissä tarkastellut lajiominaisuudet vaihtelivat niin suuresti, ettei aineiston tilastollinen analysointi ollut mahdollista. Tarkastelu tehtiin pääasiassa luontodirektiivin liitteiden II ja IV lajeista. Useimmat niistä ovat harvinaisia, osa esiintyy vain Fennoskandiassa, ja niistä on tehty vain vähän tutkimusta. Direktiivikasvien lisäksi tarkasteltiin muita kasvilajeja, joille ilmastonmuutos on uhka tai se voi olla uhka tulevaisuudessa.

**Haavoittuvat putkilokasvit:** Koska putkilokasvien tilastollinen tarkastelu ei ollut mahdollista, ei lajien haavoittuvuutta voitu tarkastella samalla tavalla kuin muilla eliöryhmillä. Yksittäisiä lajeja ja niiden haavoittuvuutta on kuitenkin tarkasteltu SUMI-hankkeen laji- ja luontotyypiraportin liitteessä 1 (Pöyry & Aapala 2020). Kirjallisuudessa esitettyjen tutkimustulosten perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että yksi ilmastonmuutokselle haavoittuvimmista putkilokasviryhmistä Suomessa on pohjoiset tunturilajit, joista monet ovat kalkinsuosijoita.

Luontodirektiivin kasveista ilmastonmuutoksen vaikutuksille herkimpiä ovat Punaisen kirjan (Hyvärinen ym. 2019) mukaan Perämeren pohjukassa esiintyvät, jääeroosiosta ja maankohoamisesta hyötyvät sukcession alkuvaiheen vesi- ja rantakasvit. Näitä ovat upossarpio (*Alisma wahlenbergii*, VU), rönsysorsimo (*Puccinellia phryganodes*, CR), pohjanpikkusorsimo (*Arctophila fulva* var. *pendulina*, EN), lietetatar (*Persicaria foliosa*, EN), ruijannuokkuesikko (*Primula nutans* subsp. *finmarchica*, NT) ja nelilehtivesikuusi (*Hippuris tetraphylla*, VU).

Niskanen ym. (2019) mallinsivat pohjoisten lajien levinneisyyttä ilmaston lämmetessä. Mallinnuksen mukaan ilmastonmuutos tulee hävittämään herkimpien tunturikasvien sopivat kasvupaikat kokonaan tai lähes kokonaan tällä vuosisadalla. Näitä ovat ruijankissankäpälä (*Antennaria nordhageniana*, EN), kiirunankello (*Campanula uniflora*, CR), hentokatkerö (*Comastoma tenellum*, EN), tunturikeulankärki (*Oxytropis lapponica*, CR) ja rikkileinikki (*Ranunculus sulphureus*, CR). Ilmastonmuutos voi supistaa myös kylmillä ja avoimilla paikoilla kasvavan rusonädän (*Sabulina rubella*, VU) kasvustoja.

### Lahopuukovakuoriaiset

Lahopuukovakuoriaisista löytyi vain yksi tutkimus (Mazziotta ym. 2016), joka käsiteli ilmastonmuutoksen ennustettuja vaikutuksia, ja oli siten sopiva tähän tarkasteluun. Lahopuukovakuoriaisten esiintymisessä ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia eteläisillä lajeilla, jotka hyödyntävät aikaisessa lahoamisvaiheessa olevaa puuta tai suurikokoisia puita, erityisesti haapaa. Ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin negatiivisia lajeilla, joiden aikuiset esiintyvät aikaisin keväällä tai alkukesällä, hyödyntävät koivua ja elävät äärevässä pienilmastossa.

**Haavoittuvat lahopuukovakuoriaiset:** Lajiominaisuuksien perusteella ilmastonmuutokselle haavoittuvimpia lajeja ovat kaukosityökykäs (*Conalia baudii*, CR), kääpämikkä (*Neomida haemorrhoidalis*, VU) ja palojahkiainen (*Sphaeriestes stockmanni*, LC). Lievemmin ilmastonmuutokselle haavoittuviksi voidaan tulkita täplämustakeiju (*Dircaea quadriguttata*, VU), idänkukkajäärä (*Leptura nigripes*, EN) ja isokelokärsäkäs (*Platyrhinus resinosus*, NT). Kahden lajin osalta puuttui tieto aikuisten esiintymisajankohdasta, mutta ne täyttivät muut haavoittuvuuden kriteerit (riippuvuus koivusta ja äärevistä pienilmastoista): kulosirkeinen (*Paranopleta inhabilis*, LC) ja hentokuorihärö (*Silvanus unidentatus*, EN).

### Lahopuusienet

Myös lahopuusienistä löytyi yksi ennustettuja vaikutuksia käsittelevä tutkimus (Mazziotta ym. 2016). Lahopuusienten esiintymisessä ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia lajeilla, jotka suosivat aikaisessa lahoamisvaiheessa olevia, isoja haapoja ja jotka eivät ole pienilmaston suhteen valikoivia. Ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin negatiivisia lajeilla, jotka eivät ole riippuvaisia muista lajeista, välttävät isoja puita, hyödyntävät muita puulajeja kuin haapaa ja, jotka suosivat lämmintä mikroilmastoa.

**Haavoittuvat lahopuusienet:** Lajiominaisuuksien perusteella nousevat esille seuraavat mahdollisesti haavoittuvat lajit: liekokääpä (*Gloeophyllum protractum*, VU), keltakerroskääpä (*Perenniporia tenuis*, CR) ja vinopoimukka (*Plicatura crispa*, DD). Kun huomioidaan myös lajit, jotka suosivat isoja puita, nousee mukaan myös salokääpä (*Dichomitus squalens*, VU).

## Jäkälät

Tarkastelussa oli mukana 13 julkaistua tutkimusta jäkälien havaituista vasteista ja neljä ennustetuista vasteista ilmastonmuutokseen. Jäkäliden esiintymisessä havaitut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia kasvien pinnalla kasvavilla rupijäkälillä. Millään lajijominaisuudella ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä havaittuihin negatiivisiin vasteisiin. Jäkäliden ennustetut muutokset olivat todennäköisemmin positiivisia vaarantuneille ja erittäin uhanalaisille lajeille.

Koska lajijominaisuuksien ja negatiivisten ilmastonmuutosvasteiden välillä ei todettu tilastollista yhteyttä, lajien haavoittuvuutta lähestyttiin käänteisesti eli poistamalla joukosta lajeja, joiden ominaisuudet liittyivät havaittuihin tai ennustettuihin positiivisiin vasteisiin suhteessa ilmastonmuutokseen. Näin toimiessa nousevat haavoittuvina lajeina esille suomutorvijäkälä (*Cladonia squamulosa*, LC), kiiltonahkajäkälä (*Peltigera polydactylon*, LC), himmeänahkajäkälä (*Peltigera scabrosa*, LC), ja poronkuppijäkälä (*Solorina crocea*, LC). Kun mukaan otetaan myös pensasmaisesti ja kivien päällä kasvavia sekä uhanalaisia jäkäliä, mukaan tulevat myös suohirvenjäkälä (*Cetrariella delisei*, LC), tunturihyttelöjäkälä (*Rostania ceranisca*, EN), tunturikarve (*Allantoparmelia alpicola*, LC), tunturiokajäkälä (*Cetraria aculeata*, LC), isohirvenjäkälä (*Cetraria islandica*, LC), louhikkotorvijäkälä (*Cladonia amaurocraea*, LC), koreatorvijäkälä (*Cladonia bellidiflora*, LC), haaratorvijäkälä (*Cladonia furcata*, LC) ja palleroporonjäkälä (*Cladonia stellaris*, LC).

### 3.1.3

#### Lajijominaisuuksien tarkastelua

Monella lajilla ilmastonmuutos ei työn pohjana olleen vuosien 2010 (muut eliöryhmät; Rassi ym. 2010) ja 2015 (linnut; Tiainen ym. 2016) uhanalaistarkastelujen perusteella ollut tärkein uhkatekijä vaan esimerkiksi maankäyttöön, ilmanlaatuun tai maamme rajojen ulkopuolisiin uhkatekijöihin liittyvät tekijät olivat usein tärkeämpiä. Tilanne on kuitenkin muuttunut nopeasti, ja vuoden 2019 uhanalaistarkastelussa (Hyvärinen ym. 2019) ilmastonmuutoksen vaikutus on korostunut useissa eliöryhmissä. Ilmastonmuutoksen vaikutusten ennustetaan voimistuvan edelleen, eikä ilmastonmuutoksen ja muiden uhkatekijöiden yhteisvaikutuksia ole tutkittu kaikilla eliöryhmillä kattavasti.

Eliöryhmien sisälläkään ilmastonmuutoksen aiheuttama uhka ei jakaudu tasaisesti, vaan tiettyjä ominaisuuksia omaavat lajit ovat jo taantuneet tai tulevat taantumaan ilmastonmuutoksen seurauksena. Pelkkä ilmastonmuutokselle altistuminen ei aina selitä lajien taantumista, sillä voimakkaasti ilmastoltaan muuttuvien alueiden kaikki lajit eivät suoraviivaisesti taannu, ja toisaalta jotkut lajit voivat taantua jo lievän ilmastonmuutoksen alueilla. Siksi ilmastonmuutoksen vaikutusten mekanismeja on tutkittava tarkemmin, ja osa tätä tutkimusta oli ilmastonmuutokselle herkkyyttä aiheuttavien lajijominaisuuksien selvittäminen. Tässä tutkimuksessa selvitettiin eliöryhmittäin, mitkä lajijominaisuudet liittyvät tilastollisesti lajien esiintymisessä jo tapahtuneisiin tai ennustettuihin, positiivisiin tai negatiivisiin muutoksiin. Tutkimus ei kuitenkaan selvittänyt lajijominaisuuksien keskinäistä suhteellista merkitystä. Pystymme siis identifioimaan, mitkä ominaisuudet liittyvät eliöryhmän lajien esiintymisen muutoksiin ja mitkä eivät, mutta emme pysty arvioimaan, mikä tai mitkä lajijominaisuudet selittävät parhaiten tapahtuneita muutoksia. Lajijominaisuuksien ja negatiivisten lajivasteiden tilastollisen yhteyden avulla on kuitenkin mahdollista tunnistaa lajeja, jotka ovat todennäköisesti haavoittuvimpia ilmastonmuutoksen vaikutuksille, ja olemme esittäneet joukon tällaisia lajeja tässä työssä.

Tuloksissa korostuu toisaalta pohjoisten, pitkälle elinympäristöihinsä erikoistuneiden ja huonosti levittäytyvien tunturi- ja suolajien herkkyyden, mutta toisaalta on huomattava, että kaikki muutokset lajien esiintymisessä eivät aiheudu ilmastonmuutoksesta. Myös muut tekijät kuten elinympäristöjen pirstoutuminen ja maaperän



rehevöityminen voivat vaikuttaa samansuuntaisesti. Tämä vaikeuttaa päätelmien ja myös ennusteiden tekemistä. Monen eliöryhmän kohdalla on lisäksi mietittävä, kuvastaako lajien nykyinen esiintyminen hyvin niiden ilmastovaatimuksia. Esimerkiksi jäkälillä metsälajien globaali levinneisyys on todennäköisesti suuresti muuttunut, kun Euroopan metsiä on hakattu ja raivattu pelloiksi jo hyvin kauan aikaa sitten. Yleinen johtopäätös siksi on, että syy-seuraussuhteiden selvittäminen vaatii joissakin lajiryhmissä aiempaa yksityiskohtaisempaa tutkimusta.

#### 3.1.4

### Varautuminen ilmastonmuutokseen

Suojelualueet ovat tärkeitä edistettäessä luonnon monimuotoisuuden sopeutumista ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin. Onkin arvioitu, että ekologisesti toimivat ja riittävät suojelualueverkostot ovat tärkein sopeutumista edistävä suoje-lukeino muuttuvassa ilmastossa (esim. Ruuhela 2012; Tuomenvirta ym. 2018). Suo-jelualueiden sisällä on mahdollista toteuttaa keinoja, joilla voidaan joko edistää tai hidastaa ennustettuja muutoksia. Suomen suojelualueverkoston painopiste sijaitsee pohjoisessa (Tuomenvirta ym. 2018; Luonnonvarakeskus 2019), jonne monen hyönteis- ja lintulajin esiintymisalue on siirtymässä. Eteläisemmässä Suomessa pienet, usein harvakseltaan esiintyvät suojelualueet eivät riitä suojelemaan lajeja ja auttamaan niitä leviämään uusiin suotuisiin elinympäristöihin.

Koska luonnonsuojelualueet voivat parhaimmillaankin kattaa vain pienen osan maa- ja vesialueiden kokonaispinta-alasta, tarvitaan toimia myös niiden ulkopuo- lella, niin sanotussa tavanomaisessa talouskäytössä olevilla alueilla (vrt. Kotiaho ym. 2019). Esimerkkejä suojelualueiden ulkopuolella toteutettavista toimista ovat luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeiden alueiden ylläpitäminen maatalous- alueilla maatalouden ympäristötuen avulla sekä metsätalouden kehittäminen siten, että ilmastonmuutoksen ja luonnon monimuotoisuuden keskinäiset riippuvuus- suhteet otetaan aiempaa paremmin huomioon (Kellomäki ym. 2008; Mazziotta ym. 2015). Yksi mekanismi tämän tavoitteen toteuttamiseksi on vapaaehtoinen suojelu METSO-ohjelman kautta. Erityisen tärkeää olisi pyrkiä synnyttämään ns. ekologisista käytäviä, joilla yhdistetään toisiinsa luonnonsuojelualueita ja mahdollistetaan lajien siirtyminen näiden välillä (Nuñez ym. 2013; Tainio ym. 2016). Eliöstön ja luonto- tyyppien sopeutumisen kannalta on tärkeää, että niihin kohdistuvia muita paineita, kuten elinympäristöjen vähenemistä, pirstoutumista ja laadun muutosta, riistalajien liiallista pyyntiä, vieraslajeja ja kemiallista kuormitusta pystytään vähentämään.

#### 3.2

### Suojelualueverkoston merkitys lintupopulaatioille ilmaston muuttuessa

Arvioitaessa luonnonsuojelualueiden toimivuutta muuttuvassa ilmastossa on kes- keistä, miten hyvin suojelualueet pystyvät turvaamaan nykyisiä eliölajien esiintymiä ja heikkeneekö lajipopulaatioiden elinvoimaisuus (populaatioiden tiheys ja koko) suojelualueilla vähemmän kuin niiden ulkopuolisilla, talouskäytössä olevilla alueilla. Hyvin tärkeä kysymys on myös se, pystyvätkö suojelualueet tarjoamaan elinympä- ristöjä uusille, leviävälle luonnonvaraisten lajien populaatioille (Thomas ym. 2012; Hiley ym. 2013; Johnston ym. 2013). Linnut ovat ekologiaaltaan ja levinneisyydeltään hyvin tunnettu lajiryhmä, jonka esiintymisalueiden ja populaatiotiheyksien muu- tokset tarjoavat merkittävää tietoa suojelualueiden ja niiden ulkopuolisten alueiden elinympäristöjen laadullisista ja määrällisistä muutoksista. Lintulajiston seuranta- ja kartoitustutkimuksien perusteella Suomessa onkin tehty merkittäviä selvityksiä siitä,

miten lajisto- ja populaatiotason muutokset maan eri osissa seuraavat ennustettuja muutoksia, ja minkä tyyppiset lajit kärsivät eniten ilmastonmuutoksen vaikutuksista (esim. Kujala ym. 2011; Santangeli ym. 2017; Lehikoinen ym. 2019). Tässä esitetään yhteenveto SUMI-hankkeessa ja siihen kiinteästi liittyvissä aiemmissa hankkeissa tehdyistä aihepiirin lintututkimuksista.

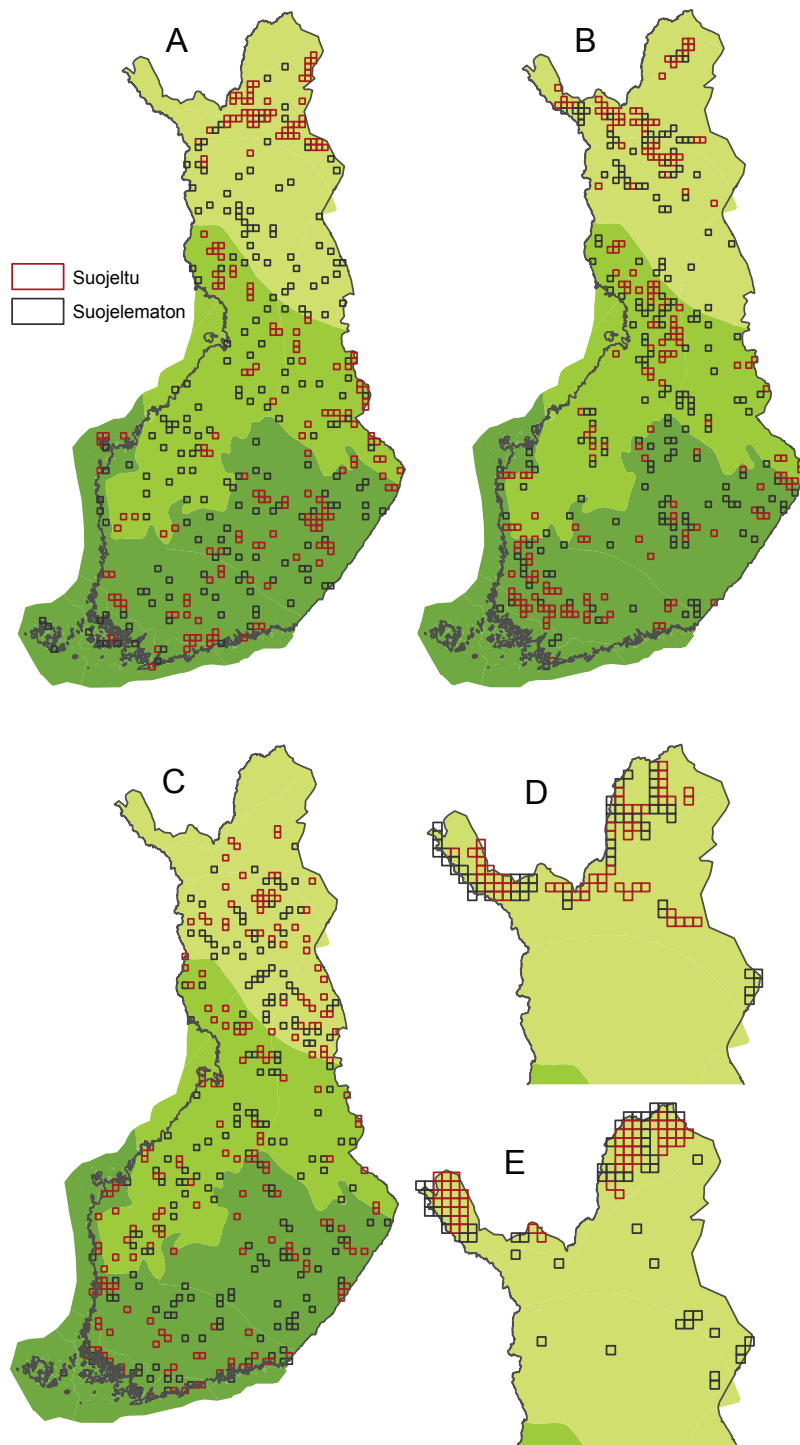
### 3.2.1

#### Havaitut ja ennustetut levinneisyysmuutokset suojelualueilla ja suojelualueiden ulkopuolella

Suojelualueverkoston merkitystä Suomen maalinustolle ilmaston muuttuessa on tarkasteltu sekä havaittujen että ennustettujen muutosten osalta. Näissä tutkimuksissa oli mukana 100 suojelullisesti merkittävää lajia, joista 90 lajia on Suomessa säännöllisesti pesiviä, ja lisäksi kymmenen lähialueilla pesivää lajia (esim. mustahaikara *Ciconia nigra*, tammitikka *Dendrocopos medius*, vihertikka *Picus viridis*, sepelsieppo *Ficedula albicollis*, viitatieäinen *Poecile palustris*), jotka malliennusteiden mukaan voivat levitä ja muodostaa pysyvän kannan Suomeen (Virkkala ym. 2013a, 2013b, 2014). Tutkimuksissa oli mukana metsien (51), soiden (21), kosteikkojen (17) ja tuntureiden (11) lajeja. Näistä lajeista 46 kuuluu lintudirektiivin liitteeseen I (erityisesti suojeltavat lajit) ja 39:llä oli niin sanottu epäsuotuisa suojelustatus Euroopassa (*unfavourable conservation status* SPEC1-SPEC3) tai Euroopan Unionissa (54 lajia). 24 lajia on IBA (Important Bird Areas) -verkoston suhteen keskeisiä arktisen tai boreaalisen vyöhykkeen biomien lajeja (Heath & Evans 2000). 17 lajia on erityisvastuulajeja, joista Suomessa on merkittävä osa (yli 15 %) Euroopan kannasta (Rassi ym. 2001), 43 lajia oli Suomessa uhanalaisia tai silmälläpidettäviä (Rassi ym. 2010) ja lisäksi 16 lajia suosii vanhoja metsiä. Mukana olleet lajit kuuluivat vähintään yhteen näistä luokista.

Tutkimuksissa verrattiin suojelualueita ja suojelemattomia alueita ja käytettiin Suomen lintuatlasten (1974–1979, 1986–1989 ja 2006–2010) sekä Euroopan lintuatlasten (1970–1990) tietoja havaittujen (Virkkala ym. 2014) ja ennustettujen levinneisyysmuutosten (Virkkala ym. 2013a, 2013b) analysoinnissa. Suomi jaettiin eteläboreaaliseen (ml. hemiboreaalinen) sekä keski- ja pohjoisboreaaliseen vyöhykkeeseen (kuva 4), ja kultakin vyöhykkeeltä laskettiin ne 10 x 10 km:n ruudut, joissa kutakin habitaattia (metsiä, soita, kosteikkoja ja tuntureita, Corine maanpeite 2006 mukaan) oli suojeltu eniten (korkein 5 % ruuduista). Näillä 'suojelualueruuduilla' esiintyvien suojelullisesti merkittävien metsä-, suo-, kosteikko- ja tunturilintujen lajimääriä verrattiin satunnaisesti valittuihin 10 x 10 km:n ruutuihin, joissa suojeluprosentti oli alhainen (ks. kuva 4). Lajien levinneisyysalueiden muutoksia ennustettiin bioklimaattisilla malleilla vuosille 2051–2080 kolmen ilmastoskenaarion, lievä (B1), keskimääräinen (A1B) ja voimakas (A2), mukaisesti olosuhteisiin (Virkkala ym. 2013a, 2013 b). Bioklimaattisessa mallinnuksessa tarkastellaan lajin nykyisen levinneisyyden korrelaatiota ilmastomuuttujiin ja ennustetaan tämän korrelaation perusteella, missä lajin tuleva levinneisyys sijaitsee perustuen ilmastoskenarioiden ilmastomuuttujien vastaaviin arvoihin (Heikkinen ym. 2006). Mallinnus perustui viiden ilmastomuuttujan ennustettuihin muutoksiin ja niiden mallinnettuun merkitykseen kullekin tutkitulle lintulajille: huhtikuun-kesäkuun keskilämpötila, kylmimmän kuukauden (helmikuu) keskilämpötila, kasvukauden tehoisa lämpösumma, huhtikuun-kesäkuun sademäärä ja vuotuinen sademäärä.

Jaksojen 1974–1989 ja 2006–2010 välillä tapahtuneiden levinneisyysmuutosten perusteella suojelullisesti arvokkaiden suo- ja tunturilajien lajimäärä pieneni sekä suojelualueilla että suojelemattomilla alueilla (Virkkala ym. 2014). Metsälajien määrä pieneni etelä- ja keskiboreaalaisella vyöhykkeellä, mutta kasvoi pohjoisboreaalaisella vyöhykkeellä, kun taas kosteikkolajien määrä kasvoi kaikilla vyöhykkeillä. Suo- ja tunturilajien väheneminen johtui siitä, että ne ovat kaikki pohjoisia. Kosteikkolajien



**Kuva 4.** Suojelualueita ja suojelemattomia alueita sisältävät 10 x 10 km ruudut metsäkasvillisuusvyöhykkeittäin. Tummanvihreä = hemi- ja eteläboreaalinen, keskivihreä = keskiboreaalinen, vaaleanvihreä = pohjoisboreaalinen. A = metsät, B = avosuot, C = kosteikot, D = tunturikoivikot ja E = tunturipaljakat. Muokattu Virkkalan ym. (2013a) mukaan.

määrän kasvu liittyi todennäköisesti siihen, että ne olivat kaikki eteläisiä lajeja, jotka hyötyvät ilmaston lämpenemisestä. Metsälajeissa sen sijaan oli sekä eteläisiä että pohjoisia lajeja, ja lajimäärän kasvu pohjoisborealisella vyöhykkeellä johtui eteläisten lajien levittäytymisestä pohjoiseen. Pääsääntönä oli, että lajimäärä oli kaikissa elinympäristöissä suojelualueilla korkeampi kuin suojelemattomilla alueilla,

ja tämä ero säilyi vuosista 1974–1989 vuosiin 2006–2010. Siten tulosten perusteella suojelualueet puskuroivat ilmastonmuutoksen negatiivisia vaikutuksia suojelullisesti merkittävien lajien levinneisyysmuutoksissa. Lajimäärien muutoksia vastaava tulos on havaittu myös tarkasteltaessa lintupopulaatioiden tiheysmuutoksia suojelualueilla ja niiden ulkopuolella (Lehikoinen ym. 2019).

Linnuille tehtyjen bioklimaattisten mallien ennusteiden perusteella suo- ja tunturilajien esiintymisen todennäköisyys pienenee vuosille 2051–2080 kaikilla vyöhykkeillä ja kosteikkolajien kasvaa kaikilla vyöhykkeillä (Virkkala ym. 2013a). Muutokset ovat kaikkein suurimmat voimakkaalla ilmastonmuutosskenaariolla (A2) ja pienimmät lievällä skenaariolla (B1). Metsälajeilla ennustettu väheneminen on suurinta eteläboreaalaisella vyöhykkeellä, kun taas pohjoisboreaalaisella vyöhykkeellä niiden esiintymisen todennäköisyys kasvaa. Tämä johtuu siitä, että eteläisiä metsälajeja on enemmän kuin pohjoisia, ja ne levittäytyivät pohjoiseen. Suomen eteläpuolelta ei ole kuitenkaan levittäytymässä eteläboreaaliseen vyöhykkeelle niin paljon lajeja kuin eteläboreaalaiselta vyöhykkeeltä siirtyy pohjoiseen. Kun tarkastellaan kaikkia 100 lajia, niin lajien esiintymistodennäköisyydet keskimäärin pienenevät, ja väheneminen on suurinta eteläboreaalaisella vyöhykkeellä. Lajien ennustettu väheneminen on suojelualueilla hieman pienempi kuin suojelemattomilla alueilla, erityisesti keski- ja pohjoisboreaalaisilla vyöhykkeillä. Siten ilmastonmuutoksen negatiivinen vaikutus suojelullisesti merkittäviin lajeihin ei ole niin suuri suojelualueilla kuin suojelemattomilla alueilla.

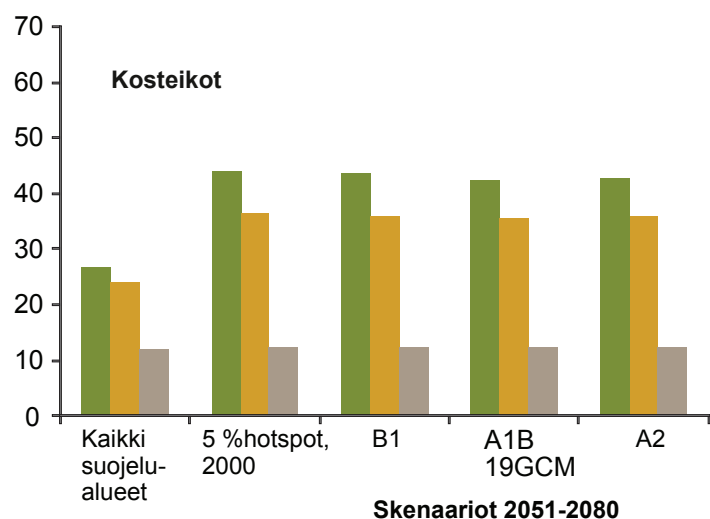
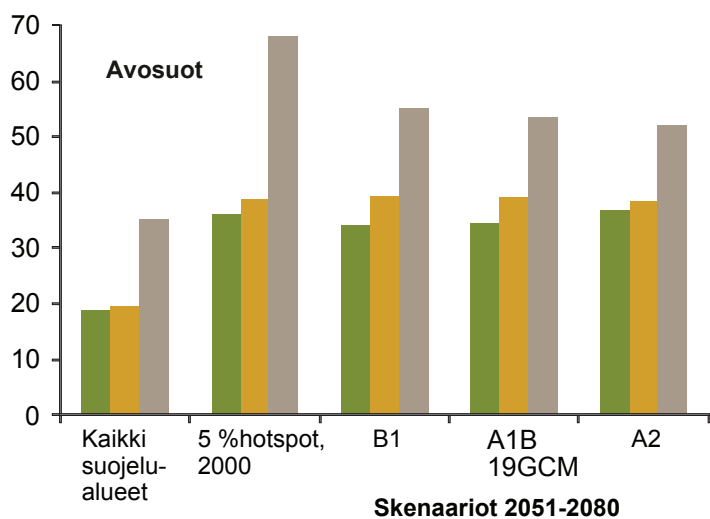
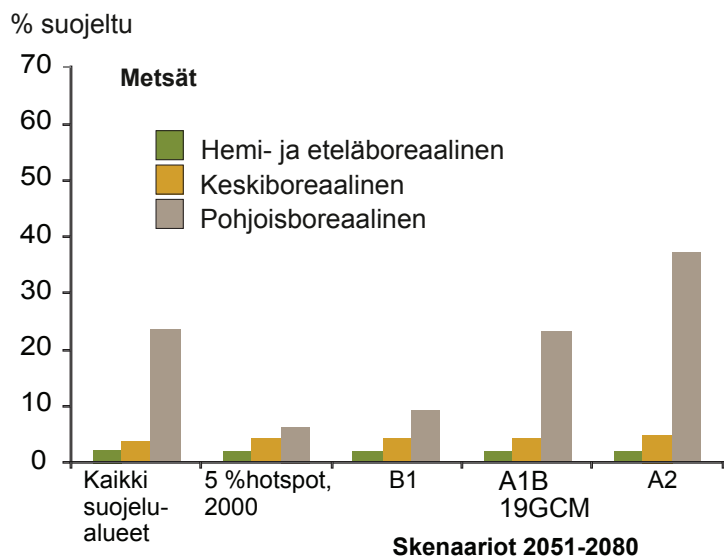
Tutkimuksessa laskettiin kullekin linturyhmälle jokaisessa vyöhykkeessä ennustettu 5 %:n ”hotspot”, eli se 5 %:n joukko ruutuja, joissa vuosien 2051–2080 ennustettu esiintymistodennäköisyys on kaikkein korkein (Virkkala ym. 2013b). Laskennassa otettiin huomioon myös ruudulla olevan elinympäristön määrä (metsä, suo, kosteikko tai tunturi, kullekin näitä elinympäristötyyppejä suosivalle lajiryhmälle). Ennustetut hotspot-ruudut sijoittuivat usein suojelutilanteen suhteen edullisiin kohtiin; niiden suojeluprosentti on korkea tunturi-, suo- ja kosteikkolinnoilla (10–70 % eri vyöhykkeillä ja eri ilmastoskenaarioilla, ks. kuva 5). Sen sijaan metsälinnoilla hotspot-ruutujen suojeluprosentti on alhainen, alle 5 %, etelä- ja keskiboreaalaisella vyöhykkeellä kaikilla skenaarioilla (B1, A1B, A2). Etelä- ja keskiboreaalisen vyöhykkeen alhaisen metsiensuojeluprosentin takia metsälintupopulaatiota ei voida näin ollen tulevaisuudessa suojella riittävästi ilmaston muuttuessa. Pohjoisboreaalaisella vyöhykkeellä hotspot-ruutujen suojeluprosentti riippuu ilmastoskenaarion voimakkuudesta ja on suurin voimakkaimmalla ilmastonmuutosskenaariolla (A2, kuva 5). Tämä johtuu siitä, että A2 skenaarion ennusteissa eteläiset metsälajit levittäytyvät kaikkein eniten pohjoisboreaaliseen vyöhykkeelle. Pohjoiset metsälajit kuitenkin vähenevät tällöin kaikkein voimakkaimmin. Tämä kuvastaa sitä, että ilmastoviisaassa suojelusuunnittelussa tulisi tarkastella useita vaihtoehtoja ja ilmastoskenaarioita.

Kun lintulajien havaittuja levinneisyysmuutoksia kullakin elinympäristötyypillä verrattiin ennustettuihin muutoksiin kullakin elinympäristötyypillä, huomattiin, että havaintojen ja ennusteiden välillä on voimakas ja tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio (Virkkala ym. 2014). Siten ennustetut muutokset vastaavat hyvin jo todettuja muutoksia lintulajien levinneisyydessä, ja ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat jo nähtävissä suojelullisesti merkittävillä lintulajeilla.

### 3.2.2

#### Koko pesimälintulajiston levinneisyyden muutokset

Suomen koko lintulajistossa (235 pesivää lajia) tapahtuneita muutoksia selvitettiin vertaamalla 1974–1989 ja 2006–2010 lintuatlasten levinneisyystietoja. Vertailun perusteella 37 % lajeista on laajentanut levinneisyysaluettaan (asuttuja 10 x 10 km:n ruutuja) ja 34,9 %:lla lajeista levinneisyysalue on pienentynyt merkitsevästi (Virkkala & Lehi-



**Kuva 5.** Suojellun elinympäristön (metsät, avosuot, kosteikot) osuus 10 x 10 km:n ruudussa metsäkasvillisuusvyöhykkeittäin vuosina 2000 ja 2051-2080 kolmen eri ilmastoskenaarion ennusteen mukaan (A2 = voimakas ilmastonmuutos, A1B 19GCM = keskimääräinen ilmastonmuutos 19 eri ilmastomallin keskiarvona, B1 = lievä ilmastonmuutos). Kaikki suojelualueet = suojellun elinympäristön osuus koko metsäkasvillisuusvyöhykkeellä vuonna 2000. 5 % hotspot = ruudut, joissa lajien esiintymisen todennäköisyys on korkein vuonna 2000 ja vuosina 2051-2080 kolmen eri ilmastoskenaarion perusteella. Muokattu Virkkalan ym. (2013b) mukaan.

koinen 2017). Lähes kaikilla lajeilla (225 kaikista 235 lajista) joko levinneisyysalueen keskipiste on siirtynyt tai levinneisyysalueen koko muuttunut. Keskimääräinen lintulajien määrä tutkituissa 10 x 10 km:n ruuduissa ei kuitenkaan ollut muuttunut, vaan lintulajiston koostumus muuttui eteläisten lajien laajentaessa levinneisyytään ja pohjoisten lajien vetäytyessä. Voimakkaimmin pohjoista kohti siirtyivät suosirrin, järripeipon, lapinuunilinnun, hiiripöllön ja riekon levinneisyysalueet. Näin ollen ilmastonmuutoksen eräs keskeinen vaikutus oli lajiston vaihtuvuuden (*turn over*) nopeutuminen, mutta lisäksi myös muut tekijät, kuten vainon loppuminen (esim. laulujoutsen, merikotka) ja maankäytön muutokset (metsätalous, maatalous) ovat vaikuttaneet lintulajien levittäytymiseen.

### 3.2.3

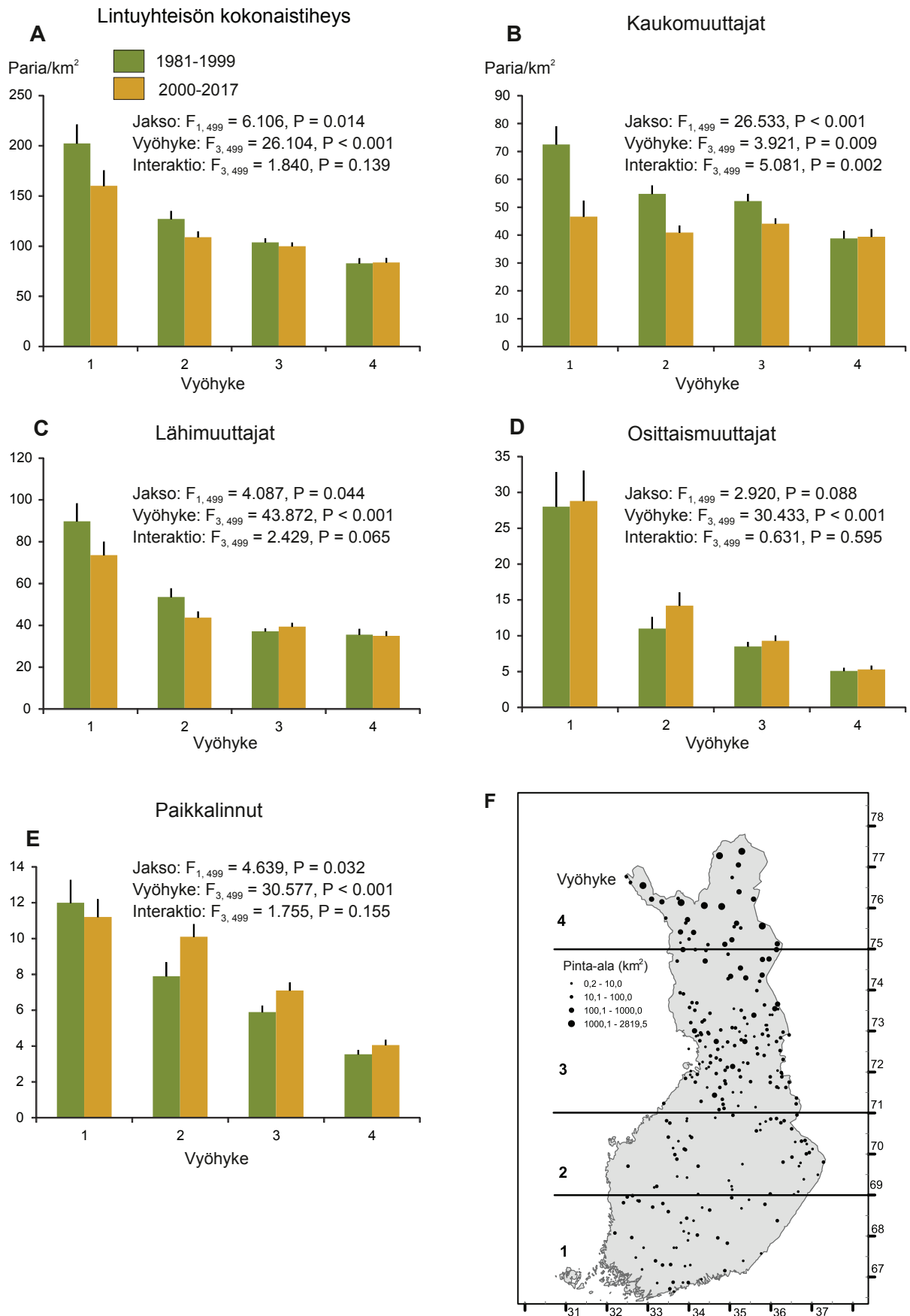
#### Lintulajien runsauden muutokset ja populaatioiden painopisteiden siirtyminen

Levinneisyysmuutosten ohella lajien tiheydet muuttuvat ja lajien runsauden painopisteet siirtyvät pohjoista kohti ilmaston muuttuessa. Esimerkiksi koko maahan levinneen lajin (kuten pajulintu) tiheyden painopiste voi siirtyä jo huomattavasti ennen kuin levinneisyysalueen rajoissa havaitaan mitään muutosta. Koko maan kattavien linjalaskentojen perusteella tiheyden painopisteen muutosta verrattiin levinneisyysalueen muutokseen 1970-luvulta 2010-luvulle (noin 35 vuoden jakso) 94 runsaimmalla maalintulajilla (Virkkala & Lehikoinen 2014). Näiden lajien tiheyden painopiste siirtyi keskimäärin noin 45 km pohjoista kohti siten, että siirtyminen oli pohjoisten lajien osalta voimakkaampaa kuin eteläisten lajien. Pohjoisilla lajeilla tiheyden painopiste myös siirtyi enemmän kuin levinneisyysalue. Tarkasteltaessa lajiryhmien populaatioiden siirtymisten suuntia 128 lintulajilla (Lehikoinen & Virkkala 2016) havaittiin, että keskimäärin lajien tiheyden painopiste siirtyi jaksojen 1970–1989 ja 2000–2012 välillä 37 km (1,5 km/vuosi) kohti pohjoiskoillista. Lajiryhmien välillä oli eroja, sillä peltolinnut, tunturilinnut ja kosteikkolinnut siirtyivät kohti luodetta tai pohjoisluodetta ja vain metsälinnut kohti koillista. Lisäksi on huomionarvoista, että keskilämpötila siirtyi huomattavasti nopeammin eli 186 km kohti pohjoiskoillista. Näin ollen linnut reagoivat ilmastonmuutokseen viiveellä.

Lintupopulaatioiden (kaikki maalintulajit) tiheysmuutoksia tutkittiin 254 suojelualueella, joissa verrattiin lintulaskentojen tuloksia vuosina 1981–1999 ja 2000–2017 (Virkkala ym. 2018). Vuoden keskilämpötila nousi jaksojen välillä 1,1 astetta ja lintujen pesinnälle tärkeä huhtikuun-kesäkuun keskilämpötila noin yhden asteen. Vaikka ilmasto muuttui eteläisille linnuille suotuisammaksi, kokonaislintutiheys pieneni suojelualueilla noin 10 % (kuva 6). Erityisesti kaukomuuttajat, jotka muuttavat Saharan eteläpuoleiseen Afrikkaan ja Aasiaan, vähenivät, mutta myös Keski-Eurooppan muuttavien lähimuuttajien populaatiot pienenivät. Kauko- ja lähimuuttajien populaatiot pienenivät erityisesti Etelä- ja Keski-Suomen suojelualueilla, mutta eivät pohjoisimman Suomen suojelualueilla (kuva 6). Kahdeksasta runsaimmasta lajista (kaikki kauko- tai lähimuuttajia) kuusi lajia väheni, yksi runsastui ja yhden populaatiotiheydessä ei ollut eroa jaksojen välillä. Erot Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä voivat johtua siitä, että Etelä- ja Keski-Suomen populaatioihin ei välttämättä siirry yhtä helposti uusia yksilöitä (ns. rekryyttejä) etelämpää Baltiasta keväiden lämpenemisen aiheuttaman muuton pidentymisen (prolongaation) seurauksena kuin Pohjois-Suomen populaatioihin Etelä-Suomesta.

Osittaismuuttajissa (osa kannasta talvehtii, osa muuttaa) ei havaittu muutoksia populaatiotiheydessä, ja paikkalintujen (kuten metso, pohjantikka ja työttötiainen) tiheydet jopa hieman kasvoivat (Virkkala ym. 2018). Paikkalintujen tiheysmuutos korreloi positiivisesti alueen kokoon eli mitä suurempi alue oli, sitä suurempi oli paikkalintujen tiheysmuutos. Kuitenkin aivan viime aikoina, vuoden 2012 jälkeen,





**Kuva 6.** Eri linturyhmien keskitiheys ( $\pm$ keskivirhe) suojelualueilla (A.-E., N=254) jaksoilla 1981-99 ja 2000-2017 neljällä eri vyöhykkeellä etelästä pohjoiseen (F). Tiheyseron tilastollinen merkitsevyys jaksojen ja vyöhykkeiden välillä sekä näiden interaktio on esitetty. Muokattu Virkkalan ym. (2018) mukaan.

paikkalintujen tiheydet ovat alkaneet pienentyä myös suojelualueilla todennäköisesti johtuen siitä, että suojelualueiden ulkopuolella lisääntyneiden hakkuiden negatiivinen vaikutus heijastuu myös suojelualueille (Virkkala ym. julkaisematon).

Lintupopulaatioiden (105 runsainta lajia) painopiste siirtyi 28,5 km pohjoiseen (1,8 km/v) tutkimusjaksojen välillä siten, että kaukomuuttajat siirtyivät eniten, keskimäärin noin 35 km, ja paikkalinnut vähiten, 14 km (Virkkala ym. 2018). Eri muuttoryhmien välillä ei kuitenkaan ollut merkitsevää eroa siirtymisessä, sillä muuttoryhmien sisällä lajien välillä oli suurta vaihtelua populaation siirtymisessä.

#### 3.2.4

### Tulevaisuuden tutkimustarpeet

Keskeisiä tulevaisuuden tutkimus- ja tietotarpeita ovat mm. (1) lajien runsauteen perustuvien mallien käyttö ennusteissa, (2) lajien sopeutumiskyky eli kyky välttää ilmastonmuutoksen negatiivisia vaikutuksia sopeutumalla tai yksilöiden nopeamman siirtymisen avulla, (3) suojelualueita ympäröivän maisemamatriisin merkitys, (4) suojelualueiden biogeofyysisten piirteiden merkitys lajeille (Virkkala ym. 2019). Runsausmallinnuksen avulla saataisiin huomattavasti nykyistä tarkempia ennusteita lajien esiintyvyydestä sekä voitaisiin paremmin arvioida lajien populaatioiden säilymistodennäköisyyttä ja kullekin lajille keskeisiä suojelualueita. Maankäyttö vaikuttaa merkittävästi myös suojelualueilla olevien lintulajien esiintymiseen (Häkikilä ym. 2017; Virkkala ym. julkaisematon), joten maankäytön ja ilmastonmuutoksen yhteisvaikutuksen tutkiminen on keskeistä. Lajien siirtyminen ja yksilöiden dispersaali eli liikkuminen ilmaston muuttuessa voi helpottua huomattavasti, mikäli suojelualueverkoston kytkeytyvyys on korkea. Tästä asiasta on kuitenkin vähän konkreettista tutkimustietoa. Suojelualueiden topografia eli korkeusvaihtelu voi vaikuttaa lajien säilyvyyteen siten, että lajit säilyvät pisimpään topografisesti vaihtelevissa ympäristöissä, joissa ilmasto-olot muuttuvat hitaimmin (esim. Suggitt ym. 2018). SUMI-hankkeessa saadut tulokset pohjoisten metsälintujen populaatiomuutoksista suojelualueilla 1981–1999 ja 2000–2017 välillä viittaavat topografisen vaihtelun hidastavan näiden lajien vähenemistä ilmaston lämmitessä (Virkkala ym. 2020).

#### 3.3

### Direktiivilajien altistuminen ilmastonmuutokselle ja haitalliselle maankäytölle

Ilmastonmuutoksen eliölajeille tuottamien uhkien arviointi on saanut 2000-luvulla kasvavaa huomiota. Analyyseissä, joissa arvioidaan lajien herkkyyttä ilmastonmuutokselle, käytetyt kriteerit luokitellaan yleensä kolmeen pääryhmään: altistuminen, herkkyys ja sopeutumiskyky ilmastonmuutoksen vaikutuksiin (ks. Luku 3.1) (Foden ym. 2013; Foden ym. 2019; Pacifici ym. 2015; Willis ym. 2015). Nämä kriteerit voidaan yhdistää eri tavoin systemaattiseksi lajin haavoittuvuuden arviointiprosessiksi painottaen joko lajiominaisuuksiin perustuvia kriteereitä (Pacifici ym. 2015) tai kokonaisvaltaista arviointia (*climate change vulnerability assessment, CCVA*), jossa hyödynnetään kaikkien kolmen edellä mainitun ryhmän kriteerejä (Foden ym. 2019; Gardali ym. 2012; Rempel & Hornseth 2017).

Haavoittuvuusanalyseillä on tunnistettu, mitkä lajit ovat uhatuimpia jonkun tietyn lajiryhmän sisällä (Gardali ym. 2012) tai jollakin tietyllä alueella (Barber ym. 2016; Gardali ym. 2012), tai tuotettu vertailuja lajiryhmien välisistä haavoittuvuuden eroista (Case ym. 2015; Foden ym. 2013). Useimmat tutkimukset ovat keskittyneet tuottamaan tietoa suojelutoimien priorisointeja varten eri lajien ja lajiryhmien välillä (Pacifici ym. 2015) eikä lajien paikallisten populaatioiden uhkien mahdollisia eroja

ole juurikaan selvitetty siitä huolimatta, että etenkin ilmastonmuutokselle altistumisen kriteerit antaisivat tähän mahdollisuuden (Gardali ym. 2012; Rannow ym. 2014). Käytännön suojelusuunnittelun näkökulmasta tätä voidaan pitää puutteena, sillä suojelualueverkoston täydentäminen ja hoitotoimien suuntaaminen vaatii usein resurssien rajallisuuden takia priorisointia. Suojelu- ja hoitotoimet tulisikin suunnata suojelualueille ja niihin lajipopulaatioihin, joissa uhkatekijät ovat keskimääräistä suurempia (Rannow ym. 2014).

Eliölajiston suojelun keskeiset mekanismit Euroopassa ovat EU:n luontodirektiivi ja lintudirektiivi, joiden lajiliitteisiin on koottu yhteisön tärkeinä pitämät lajit. Näiden lajien osalta direktiiveihin on kirjattu tavoite ylläpitää lajien suotuisa suojelutaso. Tämä edellyttää lajin kannan säilymistä elinkelpoisena luontaisella elinalueellaan, mikä viimeaikaisten näkemysten mukaan sisältää myös ilmastonmuutoksen merkityksen huomioimisen lajipopulaatioiden uhkien arvioinnissa (Rannow ym. 2014). Direktiivilajien suojelun keskeinen mekanismi on Natura 2000 -alueiden muodostama verkosto. Natura 2000 -alueet on useissa tapauksissa perustettu juuri direktiivien lajiliitteiden lajien populaatioiden säilyttämiseksi, mutta käytännössä direktiivilajien esiintymät sijaitsevat vaihtelevassa määrin sekä Natura 2000 -alueilla että suojelualueiden ulkopuolisilla matriisialueilla (Trochet & Schmeller 2013).

SUMI-hankkeessa selvitettiin 52 luontodirektiivin liitteisiin II tai IV kuuluvan lajin paikallispopulaatioiden altistumista ilmastonmuutokselle ja esiintymiä ympäröivien alueiden maankäytön haitallisuutta tai suotuisuutta populaatioille. Työssä pyrittiin tuottamaan mahdollisimman systemaattinen arvio siitä, mitkä tietyn lajin esiintymistä ovat enemmän uhattuja kuin toiset ja minkä asteisia eroja on eri lajien esiintymien haavoittuvuudessa ilmastonmuutokselle ja ympäröivien alueiden maankäytölle. Tarkasteluun valittiin maaympäristöjen tai kosteikkojen lajeja, joiden paikallispopulaatioiden sijaintitiedot tunnettiin vähintään 30 %:ssa esiintymistä vähintään sadan metrin tarkkuudella. Tämä kriteeri karsi useita luontodirektiiviin kuuluvista lajeista ja kaikki lintudirektiivin lajit pois tarkastelusta, mutta mahdollisti esiintymätietojen luotettavan liittämisen tarkalla resoluutiolla mitattuihin ilmastonmuutoksen nopeuden (*climate change velocity*) sekä maanpeitettä ja -käyttöä kuvaaviin tietoaineistoihin.

Tarkasteluun mukaan otettujen lajien paikallispopulaatioiden altistuminen ilmastonmuutokselle arvioitiin SUMI-hankkeen Natura 2000 -kohteiden analyysissä tuotetun kolmen ilmastotekijän, vuosittainen lämpösumma, tammikuun keskilämpötila ja vuosittainen vesitase, muutosnopeuden perusteella. Näiden kolmen ilmastotekijöiden muutosnopeus (*climate change velocity*) laskettiin niin kutsutun ilmastoanalogia-menetelmän (*climate-analog velocity*) avulla, jossa muutosnopeuden arvio perustuu nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa samankaltaisten paikkojen väliseen etäisyyteen (ks. tarkemmin luku 2). Mitä kauempana ilmastollisesti samankaltainen paikka tulevaisuudessa sijaitsee, sitä suurempi muutosnopeus eli sitä alttiimpi tietty lajipopulaatio on ilmastonmuutoksen haittavaikutuksille (Barber ym. 2016; Batllori ym. 2017; Brito-Morales ym. 2018). Kolmelle ilmastotekijälle arvioitiin ensin paikallinen muutosnopeus 50 x 50 m ruudukossa kautta koko Suomen, mutta tässä työssä nämä 50 metrin resoluution muutosnopeudet keskiarvoistettiin lajitietoihin paremmin yhteensopivalle 100 x 100 ruudukolle. Direktiivilajien esiintymät paikannettiin tähän ruudukkoon, jolloin yhdelle esiintymälle saatiin kolme toisiaan täydentävää paikallisen ilmastonmuutoksen nopeuden indeksiarvoa (vrt. Dobrowski ym. 2013; VanDerWal ym. 2013).

Direktiivilajien paikallispopulaatioiden säilymiseen voi vaikuttaa merkittävästi myös esiintymien ympäristön piirteet, etenkin ihmistoiminnan intensiivisyys, myös suojelualueilla sijaitsevien lajipopulaatioiden osalta (Hamilton ym. 2013; Martinuzzi ym. 2015; Radloff ym. 2010; Wilson ym. 2015). Elinympäristöjen laatua heikentävä ja muokkaava ihmistoiminta tai niiden mittava korvaaminen intensiivisesti viljelyillä

alueilla tai eriasteisesti rakennetuilla teollisuus-, taajama- ja kaupunkialueilla vaikeuttaa lajien siirtymistä suojelualueelta toiselle (Barber ym. 2016; Ewers & Didham 2006; Gimona ym. 2012). Lisäksi ympäröivien alueiden intensiivinen maankäyttö voi haitata myös itse suojelualueita ja niiden sisältämiä lajipopulaatioita ja lajiyhteisöjä. Tämänkaltaisia haittoja ovat esimerkiksi suojelualueiden, etenkin pienikokoisten, altistuminen reunavaikutuksille, lajipopulaatioiden eristyneisyyden (isolaation) voimistuminen, haitallisten hydrologisten ja muiden ympäristötekijöiden muutosten ulottuminen suojelualueelle, laajempia aluekokonaisuuksia tarvitsevien lajien populaatioiden elinvoimaisuuden aleneminen ja suojelukohteiden puskurivyöhykkeiden häviäminen (Hamilton ym. 2013; Hansen & DeFries 2007; Wilson ym. 2015). Myös seuduilla, joissa on vähänlaisesti viljelysalveita tai urbaaneja alueita, muun tyyppinen intensiivinen maankäyttö, kuten laajamittaiset avohakkuut tai soiden ojitus, voi aiheuttaa haitallisia vaikutuksia suojelualueiden ekologiin ja pienilmastollisiin piirteisiin tai lajiston monimuotoisuuteen ja lajipopulaatioiden elinvoimaisuuteen (Bernaschini ym. 2019; Häkkinen ym. 2017; Matlack 1993).

Suojelualuesuunnittelun ja suojelua edistävien hoitotoimien resurssien rajallisuuden takia maankäytön voimakkaimmin uhkaamien suojelualueiden ja lajipopulaatioiden tunnistaminen on tärkeää, jotta lajiston sopeutumisen ja hoitotoimia voidaan suunnata kiireellisimpiin kohteisiin (Hansen & DeFries 2007). Näitä vaikutuksia on tarpeen arvioida rinnakkain suojelualueiden ja populaatioiden ilmastonmuutokselle haavoittuvuuden kanssa, sillä ilmastonmuutos ja haitallinen maankäyttö voivat voimistaa toistensa negatiivisia vaikutuksia; esimerkiksi tärkeiden elinympäristöjen väheneminen matriisialueilla vaikeuttaa lajien siirtymistä uusille suotuisille alueille (Hansen ym. 2014; Oliver & Morecroft 2014; Segan ym. 2016). Erityistä huomiota tulee kiinnittää populaatioihin ja suojelualueisiin, joilla sekä ilmastonmuutokseen että ympäröivien alueiden haitalliseen maankäyttöön liittyvät uhat ovat keskimääräistä voimakkaampia.

Direktiivilajeille ilmastonmuutoksesta sekä lajiesiintymien ympäröivien alueiden maankäytöstä aiheutuvia uhkia arvioitiin SUMI-hankkeessa seuraavien laskennallisten muuttujien avulla:

### **(A) Paikallisen ilmastonmuutoksen nopeuden indeksit**

Nämä indeksit keskiarvoistettiin 100 x 100 m ruudukolle lajitietojen tarkkuuden (usein 100 metriä maksimissaan) takia, minkä jälkeen ne linkitettiin esiintymien tietoihin. Jokaiselle lajiesiintymälle laskettiin kolmen muutosmuuttujan arvot:

1. Lämpösumman muutosnopeus; lämpösumma vuosina 1981–2010 vs. vuosina 2040–2069 ilmastoskenaariossa RCP4.5 ennusteiden mukaan
2. Tammikuun keskilämpötilan muutosnopeus; 1981–2010 vs. RCP4.5 2040–2069
3. Vesitasen (sateisuus vs. haihdunta) muutosnopeus; 1981–2010 vs. RCP4.5 2040–2069

### **(B) Lajiesiintymien lähiympäristön maankäytön negatiiviset ja positiiviset piirteet**

Lajiesiintymien lähiympäristön ja itse esiintymän maankäytön negatiiviset (lajipopulaatioiden säilymistä uhkaavat) piirteet ja positiiviset (lajipopulaatioiden säilymistä tukevat) piirteet arvioitiin 150 x 150 metrin kokoiselta ruudulta, jonka ytimessä oli lajiesiintymän keskimääräinen arvioitu sijaintipiste. Arvioinnissa kirjattiin, sijaitseeko esiintymä suojelualueella vai ei, ja jokaiselle lajille erikseen mitattu arvio 150 x 150 metrin ruudun sisältämästä negatiivisen ja positiivisen maankäytön suhteellisesta määrästä (peittävydestä a.o. ruudulla). Arvioiden lajikohtainen mittaaminen oli tarpeen koska erityyppisen maankäytön (kuten soiden ojitus tai avohakkuut) hai-

tallinen merkitys vaikuttaa eri tavoin eri elinympäristöjen lajeihin. Lähtökohtaisena oletuksena oli, että esiintymää ympäröivän 150 x 150 metrin lähialueen maankäyttö voi suoraan vaikuttaa lajiesiintymien säilymiseen (Hansen & DeFries 2007; Hansen ym. 2014; Radeloff ym. 2010; Wilson ym. 2015). Arvioinnissa käytetyt kriteerit olivat:

1. Lajiesiintymä sijaitsee / ei sijaitse Natura 2000 -alueella
2. Lajiesiintymä sijaitsee / ei sijaitse Natura 2000 -alueella tai jollakin muulla suoje-lualueella
3. Lajille positiivisen maankäytön tai elinympäristöjen määrä 150 x 150 m ruudussa
4. Lajille negatiivisen maankäytön tai elinympäristöjen määrä 150 x 150 m ruudussa
5. Suojelualueiden määrä 150 x 150 m ruudussa

### (C) Maisematason negatiiviset ja positiiviset piirteet

Lajiesiintymiä ympäröivän laajemman maiseman maankäytön negatiiviset ja po-sitiiviset piirteet arvioitiin 5 x 5 kilometrin kokoiselta alueelta, jossa esiintymä oli ruudun keskipisteenä. Arvioidut muuttujat olivat suurelta osin samoja kuin esiinty-mien lähiympäristön maankäytön ja elinympäristöjen arvioinnissa käytetyt muut-tujat. Lisäksi positiivisena kriteerinä käytettiin saman lajin esiintymien määrää 5 x 5 kilometrin ruudussa; suurempi erillisten populaatioiden määrä voi turvata me-tapopulaatioina esiintyvien lajien säilymistä tai toimia niin sanottuna pelastavana mekanismina (*rescue effect*) jos itse arvioinnin kohdepopulaatio häviää. Lisäksi suotui-sien elinympäristöjen runsaus maisemassa auttaa lajiyksilöiden leviämistä läheisille kohteille tai kokonaan uusille alueille, kun taas voimakkaasti ihmisvaikutteinen maankäyttö vähentää näitä mahdollisuuksia. Käytetyt muuttujat olivat:

1. Lajille positiivisen maankäytön tai elinympäristöjen määrä 5 x 5 kilometrin ruu-dussa
2. Lajille negatiivisen maankäytön tai elinympäristöjen määrä 5 x 5 kilometrin ruu-dussa
3. Suojelualueiden määrä 5 x 5 kilometrin ruudussa
4. Saman lajin esiintymien lukumäärä 5 x 5 kilometrin ruudussa

Kaikkien selvityksessä mukana olleiden direktiivilajien analyysien tulokset tullaan esittelemään valmisteilla olevassa tieteellisessä julkaisussa (Heikkinen ym. julkai-sematon). Tässä loppuraportissa esitellään esimerkin omaisesti kuuden metsälajin (taulukko 3) ja neljän suolajin (taulukko 4) tuloksia. Esiintymien lukumäärä vaihtelee huomattavasti näiden kymmenen direktiivilajin välillä, alle kahdestakymmenestä (haavansahajumi ja hitupihtisammal) yli viiteensataan (kiiltosirppisammal ja letto-rikko), mikä tuottaa lähtökohtaisia eroja lajien välille haavoittuvuudessa. Useimmilla lajeilla yli puolet esiintymistä sijaitsee suojelualueilla tai Natura 2000 -alueilla, lapin-sirppisammalella lähes kaikki esiintymät ovat suojelualueilla.

Ilmastotekijöiden muutosnopeuden suhteen on lajien välillä selviä eroja. Suolaji-en esiintymien osalta altistuminen kesäolojen muutoksille on keskimäärin selvästi alempi kuin metsälajien, ja talviolosuhteiden muutosnopeuden suhteen tilanne on päinvastainen. On kuitenkin tärkeää huomata, että molemmissa elinympäristöissä kaikkien lajien paikallisten populaatioiden välillä on hyvin merkittäviä ja moninker-taisia eroja muutosnopeudessa sekä lämpösumman että tammikuun keskilämpötilan suhteen. Suurimmat erot nähdään kiiltosirppisammalen esiintymien välillä, jolla esimerkiksi lämpösumman muutosnopeus vaihtelee välillä 0,06 – 6,71 km/vuosi; tämä aiheuttaa huomattavia eroja populaatioiden altistumisessa kesäolosuhteiden muutokselle. Vesitaseen osalta erot sekä lajien että lajipopulaatioiden välillä ovat keskimäärin selvästi lievempiä.

**Taulukko 3.** Kuusi luontodirektiivin liitteiden II ja IV metsäisten elinympäristöjen lajia, niiden esiintymien lukumäärä, kolmen ilmastotekijän (lämpösumma, tammikuun keskilämpötila ja vesitase) muutosnopeus esiintymisalueilla, ja lajeille haitallisen ja suotuisan maankäytön ja elinympäristöjen suhteellinen peittävyys esiintymien lähiympäristössä (150 x 150 metrin ruutu esiintymän keskipisteen ympärillä) ja maisemassa (5 x 5 kilometrin ruutu). Esiintymien lukumäärän kohdalla esitetään suluissa 100 metrin tarkkuudella tiedossa olevien esiintymien määrä sekä tarkastelussa käytettyjen esiintymien lopullinen määrä, kun vierekkäisten ruutujen esiintymät on yhdistetty laajemmiksi esiintymien ryppäiksi. Muutosnopeuden haitallisen ja suotuisan maankäytön sekä suojelualueiden määrän osalta on esitetty esiintymien keskiarvo, minimi ja maksimiarvo (kaksi jälkimmäistä suluissa). Suotuisa maankäyttö kertoo kullekin lajille soveltuvan elinympäristön tai suotuisan maankäytön määrän ympäristössä, samoin haitallinen maankäyttö jokaiselle lajille haitallisen maankäytön määrän. Suojelualueiden määrä ilmentää kaikenlaisien suojelualueiden määrän ympäristössä, jolla oletetaan olevan yleisluonteinen positiivinen vaikutus lajipopulaatioiden säilymiselle.

Laji	Haavansahajumi <i>Xyletinus tremulicola</i>	Hajuheinä <i>Cinna latifolia</i>	Hitupihtisammal <i>Cephalozia macounii</i>	Korpihohtosammal <i>Herzogiella turfacea</i>	Korpikolva <i>Pytho kolwensis</i>	Myyränporras <i>Diplazium sibiricum</i>
<b>Esiintymien lukumäärä</b>	19 (24)	161 (215)	12 (14)	153 (178)	59 (123)	168 (222)
<b>Lämpösumman muutosnopeus*</b>	3,37 (1,67 - 4,91)	3,76 (1,48 - 6,75)	3,97 (2,99 - 5,18)	4,48 (1,78 - 6,80)	3,18 (1,37 - 4,79)	2,07 (0,16 - 5,41)
<b>Tammikuun lämpötilan muutosnopeus*</b>	4,70 (2,27 - 6,23)	4,88 (1,45 - 6,48)	4,78 (4,24 - 5,28)	4,71 (1,47 - 6,38)	4,52 (2,47 - 6,95)	5,38 (2,55 - 8,71)
<b>Vesitaseen muutosnopeus*</b>	0,01 (0 - 0,08)	0,02 (0 - 0,36)	0,04 (0 - 0,12)	0,02 (0 - 0,57)	0,17 (0 - 0,37)	0,01 (0 - 0,14)
<b>Lajiesiintymä sijaitsee Natura 2000 -alueella (lukumäärä / %)</b>	13 (68,4%)	39 (24,2%)	7 (58,3%)	53 (34,6%)	47 (79,7%)	105 (62,5%)
<b>Lajiesiintymä sijaitsee suojelualueella (lukumäärä / %)</b>	16 (84,2%)	67 (41,6%)	11 (91,7%)	86 (56,2%)	52 (88,1%)	121 (72,0%)
<b>Haitallinen maankäyttö % (150 m ruutu)</b>	12,9 (0 - 100)	10,7 (0 - 66,7)	3,3 (0 - 19,4)	21,5 (0 - 100)	0,3 (0 - 8,3)	7,1 (0 - 77,1)
<b>Suotuisa maankäyttö % (150 m ruutu)</b>	30,7 (0 - 100)	14,7 (0 - 100)	50,3 (9,3 - 98,2)	3,8 (0 - 62,2)	49,8 (0 - 100)	30,8 (0 - 100)
<b>Suojelualueiden määrä % (150 m ruutu)</b>	83,9 (0 - 100)	26,3 (0 - 100)	88,1 (44,0 - 100)	41,1 (0 - 100)	90,6 (0 - 100)	60,9 (0 - 100)
<b>Haitallinen maankäyttö % (5 km ruutu)</b>	10,7 (2,8 - 19,5)	23,8 (3,3 - 57,6)	26,8 (17,5 - 37,0)	33,7 (4,4 - 68,4)	4,8 (0,8 - 17,3)	14,8 (0 - 46,2)
<b>Suotuisa maankäyttö % (5 km ruutu)</b>	3,9 (0,4 - 13,1)	3,3 (0 - 34,9)	22,7 (1,2 - 60,9)	0,2 (0 - 1,3)	24,7 (0,9 - 53,0)	2,6 (0 - 19,2)
<b>Suojelualueiden määrä % (5 km ruutu)</b>	39,2 (10,6 - 86,7)	9,6 (0 - 92,6)	34,6 (1,2 - 70,7)	11,0 (0 - 76,0)	50,0 (1,7 - 82,8)	23,5 (0 - 100)
<b>Lajin esiintymien lukumäärä (5 km ruutu)</b>	0,7 (0 - 2,0)	1,6 (0 - 7,0)	1,2 (0 - 3,0)	0,6 (0 - 5,0)	3,5 (0 - 10,0)	3,5 (0 - 13)

\* muutosnopeus laskettu ilmastoanalogia -menetelmällä (ks. Luku 2); indeksin yksikkö = km/vuosi

Sekä lajeille suotuisan että negatiivisen maankäytön määrässä on lajien välillä keskimääräisiä merkittäviä eroja. Suolajeilla ei pohjoispainotteisen levinneisyyden ansiosta ole kovin paljon haitallista maankäyttöä esiintymien ympäristössä, kun taas metsälajien välillä sekä suotuisien että haitallisten elinympäristöjen määrä vaihtelee voimakkaammin. Kuitenkin näidenkin kriteerien kohdalla lajin sisäinen vaihtelu on huomattavasti laajempaa kuin lajien välinen vaihtelu. Voimakkaimmat erot ovat lajeilla, joilla sekä suotuisan että haitallisen maankäytön määrä ympäristössä vaihtelee nolosta sataan prosenttiin, kuten esimerkiksi haavansahajumilla ja kiiltosirppisamallella. Lajiesiintymien lukumäärä populaatiota ympäröivässä maisemassa (5 x 5 km ruudussa) vaihtelee odotetusti lajipopulaatioiden kokonaismäärän mukaisesti, ja tässä tarkastelussa esiintymien määrä on suurin suolajeista lettorikolla ja metsälajeista myyränportaalla.



Tuloksien perusteella lajien haavoittuvuudessa ilmastonmuutoksen ja maankäytön vaikutuksille on merkittäviä eroja sekä lajien välillä että etenkin saman lajin eri esiintymien välillä. Nämä erot ovat siten tärkeää huomioida ilmastovii-  
saassa lajien suojele- ja hoitotoimien suunnittelussa. Syventävissä jatkotutkimuk-  
sissa yksi keskeinen tavoite on paikantaa populaatioita, joissa sekä ilmastonmuu-  
toksen nopeuden että maankäytön uhat ovat voimakkaimmillaan, sekä myös  
kytkemään analyysiin vielä informaatiota siitä, mitkä tarkasteltavista lajeis-  
ta ovat lajiominaisuuksiensa (mm. elinympäristövaatimukset ja leviämiskyky)  
perusteella keskimääräistä haavoittuvampia globaalimuutoksen vaikutuksille.

**Taulukko 4.** Neljä luontodirektiivin liitteiden II ja IV suolajia, niiden esiintymien lukumäärä, kolmen ilmastotekijän muutosnopeus esiintymisalueilla, ja lajille haitallisen ja suotuisan maankäytön ja elinympäristöjen suhteellinen peittävyys esiintymien lähiympäristössä ja maisemassa. Taulukossa esitetyt muuttujat ovat samat kuin taulukossa 3.

Laji	Isonuijasammal <i>Meesia longiseta</i>	Kiiltosirppi- sammal <i>Hamatocaulis vernicosus</i>	Lapinsirppi- sammal <i>Hamatocaulis lapponicus</i>	Lettorikko <i>Saxifraga hirculus</i>
<b>Esiintymien lukumäärä</b>	95 (191)	673 (4111)	33 (85)	757 (1292)
<b>Lämpösumman muutosnopeus</b>	0,91 (0,02 – 6,21)	0,87 (0,06 – 6,71)	1,25 (0,35 – 6,09)	0,81 (0,02 – 3,59)
<b>Tammikuun lämpötilan muutosnopeus</b>	5,15 (1,48 – 7,97)	5,51 (1,48 – 8,75)	5,46 (1,71 – 6,38)	5,35 (1,55 – 8,84)
<b>Vesitaseen muutosnopeus</b>	0,01 (0 – 0,17)	0,01 (0 – 0,23)	0,02 (0 – 0,12)	0,1 (0 – 0,19)
<b>Lajiesiintymä sijaitsee Natura 2000 -alueella (lukumäärä / %)</b>	66 (69,5%)	453 (67,3%)	31 (93,9%)	480 (63,4%)
<b>Lajiesiintymä sijaitsee suojelualueella (lukumäärä / %)</b>	67 (70,5%)	460 (68,4%)	32 (97,0%)	475 (62,7%)
<b>Haitallinen maankäyttö % (150 m ruutu)</b>	5,1 (0 – 72,2)	6,3 (0 – 100)	4,8 (0 – 66,7)	9,8 (0 – 100)
<b>Suotuisa maankäyttö % (150 m ruutu)</b>	38,5 (0 – 100)	50,1 (0 – 100)	22,9 (0 – 100)	36,5 (0 – 100)
<b>Suojelualueiden määrä % (150 m ruutu)</b>	69,5 (0 – 100)	66,3 (0 – 100)	80,0 (0 – 100)	61,0 (0 – 100)
<b>Haitallinen maankäyttö % (5 km ruutu)</b>	4,6 (0 – 29,6)	10,5 (0 – 53,8)	8,8 (0,3 – 33,5)	8,8 (0 – 51,3)
<b>Suotuisa maankäyttö % (5 km ruutu)</b>	6,9 (0 – 34,7)	11,2 (0 – 60,2)	9,1 (0 – 33,5)	7,1 (0 – 45,7)
<b>Suojelualueiden määrä % (5 km ruutu)</b>	43,1 (0 – 100)	35,5 (0 – 100)	42,3 (0 – 99,5)	34,2 (0 – 100)
<b>Lajin esiintymien lukumäärä (5 km ruutu)</b>	1,3 (0 – 7,0)	5,9 (0 – 24,0)	2,1 (0 – 8,0)	3,5 (0 – 22,0)

## 4 Luontotyypit muuttuvassa ilmastossa

*Ilmastonmuutoksen vaikutukset luontotyyppeihin ovat ensisijassa laadullisia. Nykytiedon valossa luontotyyppiäsiintymiä voi myös hävitä ilmastonmuutoksen seurauksena; esimerkiksi rannikon hauru- ja meriajokasvallit ja primäärisuknessioon liittyvät luontotyypit, tuntureiden lumenpysymät ja -viipymät sekä pohjoisen palsat ovat uhattuina muuttuvan ilmaston takia. Häviämiskaavassa olevien luontotyyppien lisäksi ilmastonmuutokselle herkeimmiksi luontotyypeiksi on tunnistettu muun muassa virtavesien latvapurot, Tunturi-Lapin pienvedet, perinnebiotoopit, tunturikoivikot, tunturikankaat, eteläiset aapasuot, lähteet ja lähdesuot sekä avoimet ja puoliavoimet kallioluontotyypit. Ilmastonmuutoksen myötä luontaisten abioottisten ja bioottisten häiriöiden ennustetaan lisääntyvän. Tämän arvioidaan vaikuttavan positiivisesti metsäluontotyyppien rakenteeseen muun muassa lisäämällä kuolleen puun sekä runsaslahopuustoisten nuorten sukessiovaiheiden ja lehtipuiden määrää.*

*Ennallistaminen ja luonnonhoito ovat tärkeitä keinoja lajien elinympäristöjen ja luontotyyppien tilan parantamiseksi muuttuvassa ilmastossa. Pyrkimys ekosysteemien toiminnallisten ja rakenteellisten ominaispiirteiden palauttamiseen on hyvä lähtökohta myös tulevaisuuden muuttuvissa oloissa. Kohdentamalla ennallistamista ja luonnonhoitoa ilmastoviisaasti voidaan tukea lajien siirtymistä. Ilmastonmuutos on tarpeen integroida osaksi ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelua sekä suojelualueilla että suojelualueiden ulkopuolella.*

### 4.1

#### Luontotyyppien herkkyys ilmastonmuutokselle

Tämän osatyön tavoitteena oli muodostaa kirjallisuuteen perustuva tilannekuva ilmastonmuutoksen aiheuttamista havaituista tai ennustetuista muutoksista luontotyypeissä. Katsaus keskittyy luontodirektiivin liitteen I Suomessa esiintyviin maaympäristön ja sisävesien luontotyyppeihin. Luontotyyppinä ja ilmastonmuutosta käsitteleviä julkaisuja etsittiin systemaattisesti pääasiassa Web of Science- ja Google Scholar-tietokannoista. Hakusanoina käytettiin luontotyyppien luontodirektiivin mukaista englanninkielistä nimeä tai osaa siitä yhdistettynä "climat\* change" hakutermiin. Jos haku ei tuottanut tuloksia, sitä yleistettiin ja käytettiin hakusanana esimerkiksi luontotyyppiryhmän nimeä, kuten "river\* OR stream\* OR brook\*" ja lisämääreenä "boreal". Kirjallisuushaku kohdennettiin erityisesti boreaalille vyöhykkeelle, mutta jossain määrin käytiin läpi muutakin eurooppalaista sekä arktisen alueen tutkimusta. Tunturiluontotyyppien osalta hyödynnettiin luontotyyppien uhanalaisuuden arviointia varten tehtyä tuoretta ja kattavaa tarkastelua ilmastonmuutoksen vaikutuksista tunturiluontotyyppeihin (Turunen ym. 2018). Muista luontotyyppiryhmistä poiketen metsissä tarkasteltiin luontotyyppien sijasta ilmastonmuutoksen myötä voimistuviksi arvioituja abioottisia ja bioottisia häiriöitä ja niiden vaikutuksia metsien rakennepiirteisiin.

Luontotyyppiryhmittäiset tarkemmat tulokset julkaistaan yhdessä vastaavan lajitarkastelun kanssa (Pöyry & Aapala 2020) ja ohessa esitetään tiivis yhteenveto luontotyyppiryhmittäin.

#### 4.1.1

### Luontotyyppiryhmittäiset tulokset

Rannikon luontotyypit sijaitsevat kapealla vaihettumisvyöhykkeellä meren ja mantereiden välissä, mikä tekee niistä haavoittuvia monille ilmastonmuutoksen vaikutuksille. Merenpinnan noustessa yksi sopeutumiskeino on siirtyä sisämaahan päin, mutta sitä rajoittaa yleensä intensiivinen maankäyttö tai olosuhteiden soveltumattomuus. Luontotyyppien siirtymistä pohjoiseen rajoittaa rannikon päättyminen Perämerelle ja ennustettu Itämeren suolapitoisuuden lasku, mikä vaikuttaa suoraan hauru- ja meriajokasvalliin, mutta myös monien suolaa sietävien tai vaativien rantakasvien sopeutumismahdollisuuksiin. Maankohoamiseen liittyvän primäärisukessiovaiheen luontotyypeiltä tila voi loppua kokonaan merenpinnan nousun hidastaessa tai estäessä maankohoamisen vaikutukset. Kaikki rannikon luontotyypit, ruokovalleja lukuun ottamatta, ovat tavalla tai toisella herkkiä ilmastonmuutokselle, mikä johtuu erityisesti edellä mainitusta siirtymismahdollisuuksien rajallisuudesta sekä kolmelta suunnalta – maalta, mereltä ja ilmasta – tulevista ilmastonmuutosvaikutuksista. Nykytiedon valossa herkimpiä ovat rantavalliin alatyypit hauru- ja meriajokasvallit, primäärisukessiovaiheen luontotyypit sekä merenrantaniityt.

Sisävesien ja niiden rantojen luontotyypit ovat herkkiä erityisesti sademäärissä, sateiden ajoittumisessa sekä valunnan ja virtaaman määrissä ja ajoittumisessa tapahtuville muutoksille. Lisääntyvät talvisateet esimerkiksi lisäävät ravinteiden ja kiintoaineiden huuhtoutumista vesistöihin vaikuttaen niiden hydrologiseen tilaan ja eliöyhteisöihin. Virtaama- ja jääolosuhteiden muutokset vaikuttavat etenkin virtavesien rantavyöhykkeiden kasvillisuuteen (Ström ym. 2011; Ström ym. 2012; Nilsson ym. 2013; Lind ym. 2014; Lind & Nilsson 2015; Jansson ym. 2019). Myös vesistön koko (sopeutumiskyky) ja maantieteellinen sijainti (altistuminen) vaikuttavat sisävesien luontotyyppien herkkyyteen ilmastonmuutokselle. Kaikkein herkimiksi on tunnistettu pienimmät ja pohjoisimmat vesistöt, kuten virtavesien latvapurot ja subarktisen alueen (Tunturi-Lapin) pienvedet (Markovic ym. 2017; Mustonen ym. 2018).

Ilmastonmuutos, erityisesti lämpötilan nousu, kasvukauden piteneminen, lisääntyvä sadanta ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousu, voi lisätä rehevöitymistä ja kiihdyttää umpeenkasvua perinnebiotoopeilla (Lehtomaa ym. 2018). Perinnebiotoopit ovat riippuvaisia hoidosta. Siten hoidon päättyminen yhdessä ilmastonmuutoksen kanssa voi kiihdyttää perinnebiotooppien umpeenkasvua entisestään, minkä takia niiden säilyminen vaatisi jatkossa entistä enemmän hoitoa. Myös pienet pinta-alat ja pirstaleinen esiintyminen heikentävät perinnebiotooppien sopeutumiskykyä muutuvissa olosuhteissa. Jotta perinnebiotoopit voisivat säilyä, pitäisi hoitoa tehostaa, hoidettuja kohteita ja suojelualueita laajentaa, ja niiden kytkeytyvyyttä parantaa (Buse ym. 2015, Vermaat ym. 2017).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät tunturiluonnossa nopeimmin lumen- viipymissä ja -pysymissä, tunturikoivikoissa sekä tunturikankailla (Niittynen ym. 2018; Turunen ym. 2018; Markkula ym. 2019). Lämpenevässä ilmastossa yleistyvät tunturi- ja hallamittarituhot sekä levinneisyysaluettaan laajentavat havupuut yhdessä poron aiheuttaman laidunpaineen kanssa voivat uhata tunturikoivun uudistumista. Tunturikankailla ilmaston lämpeneminen ja sateiden lisääntyminen aiheuttavat rehevöitymistä ja umpeenkasvua. Lumipeitteisen ajan lyhentyessä ja lumilaikkujen pienentyessä lumenviipymät ja -pysymät ja niihin sopeutunut lajisto häviävät vähitellen.

Soita koskeva ilmastonmuutostutkimus on painottunut soiden hiilenkiertoon ja kasvihuonekaasuihin, ja palsasoita lukuun ottamatta ilmastonmuutoksen vaikutuksia soiden luontotyyppeihin on tutkittu melko vähän. Ilmastonmuutoksen on jo havaittu vaikuttaneen palsojen sulamiseen sekä niiden esiintymisen äärialueilla (Sollid ja Sørbel 1998; Zuidhoff ja Kolstrup 2000) että ydinalueilla (Borge ym. 2017). Ennusteiden mukaan valtaosa Suomen palsoista voi sulaa vuosisadan loppuun mennessä (Fronzek 2013). Myös muut routavaikutteiset soiden rakennepiirteet todennäköisesti taantuvat (Kaakinen ym. 2018). Koska suurilmasto, erityisesti lämpötila ja sademäärä, selittävät keidas- ja aapasoiden nykylevinneisyyttä, tulee ilmastonmuutos vaikuttamaan niiden levinneisyysalueisiin. Meneillään olevassa tutkimushankkeessa Tahvanainen ym. (2018) pyrkivät ennustamaan aapasoiden tulevia muutoksia hydrologisten ja ilmastomallien avulla. Tavoitteena on muun muassa selvittää nopeuttaako ilmastonmuutos aapasoiden sukkessiokehitystä keidassoiksi, erityisesti keidas-aapasoiden vaihettumisvyöhykkeellä. Ruuhijärvi (2018) on ennakoitnut mätäspintaisen kasvillisuuden lisääntymistä väli- ja rimpipintojen kustannuksella etelä- ja keskiborealisilla vyöhykkeillä. Pohjavesien on jo havaittu lämmenneen Pohjois-Euroopassa ja lämpenemisen ennustetaan jatkuvan kohti vuosisadan loppua (Jyväsjärvi ym. 2015). Pohjavesien lämpenemisen ennustetaan muuttavan lähteiden ja lähdevaiikutteisten soiden lajikoostumusta (Jyväsjärvi ym. 2015). Ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän laaja-alaisia, puustoa tappavia abioottisia ja bioottisia häiriöitä ja näiden häiriöiden voi olettaa vaikuttavan puustoisten soiden puuston rakenteeseen samaan tapaan kuin kivennäismaiden metsissäkin.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella ilmastonmuutoksen vaikutusta kallioluontotyyppeihin ei ole tutkittu juuri lainkaan. Vaikutuksia on kuitenkin mahdollista epäsuorasti arvioida muita kuin kallioiden luontotyyppejä koskevien tutkimusten sekä kallioluonnon ekofysiologisten tutkimusten perusteella. Laajan pienilmastollisen vaihtelun katsotaan merkitsevän, että kallioiden, erityisesti suojaiset varjorinteet, voivat olla merkittäviä refugioita viileitä oloja vaativille lajeille (Speziale & Ezcurra 2015). Ison kokonsa takia rotkot ja kurut saattavat olla Suomessa havumetsävyöhykkeen tärkeimpiä refugioita. Puuston ja kenttäkerroksen lisääntyminen lisää varjostusta kallioiden, mikä voi vähentää kasvupaikan paahteisuutta ja heikentää kallioiden esiintyvien paahdelajien sopeutumista ilmastonmuutokseen. Pohjoisen kalliolajiston voi olettaa pääasiassa taantuvan, mutta eteläisestä lajistosta osa hyötynee ilmastonmuutoksesta. Kaikkiaan kallioiden luontotyyppien voidaan odottaa muuttuvan selvästi, mutta muutoksen yksityiskohtia ei voida kuitenkaan nykytiedoin ennustaa. Muutokseen vaikuttavat sekä lämpötila, sademäärä että hiilidioksidipitoisuuden kasvu, mutta näiden suhteellista merkitystä on vaikea arvioida.

Ilmastonmuutoksen ennustetaan muuttavan metsien häiriödynamiikkaa, ja sitä kautta metsäluontotyyppien rakennetta, monella tavalla. Erilaisten puustoa tappavien laaja-alaisen abioottisten häiriöiden (metsäpalot, kuivuus, tuuli, lumi ja jää) ja bioottisten häiriöiden (hyönteistuholaiset, patogeenit) ennustetaan lisääntyvän (Soja ym. 2007; Seidl ym. 2017). Vaikka ilmastollisen metsäpaloriskin on ennustettu kasvavan ilmastonmuutoksen myötä (de Groot ym. 2013; Mäkelä 2015; Venäläinen ym. 2016; Lehtonen 2017), tehokas palontorjunta tulee hyvin todennäköisesti estämään paloalan merkittävän lisääntymisen Suomessa myös tulevaisuudessa (Lindberg 2017). Ilmastonmuutoksen myötä poikkeukselliset kuivuusjaksot tulevat ennusteiden mukaan yleistymään, mikä todennäköisesti lisää puuston kuolleisuutta. Sulan maan ajan piteneminen ja roudattomuus tulevat lisäämään tuulenkaatojen mahdollisuutta. Pintajuurinen kuusi on erityisen tuuliherkkä, minkä lisäksi se on herkkä myös kuivuusstressille. Ilmaston lämmetessä eteläisten hyönteistuholaisten ja kasvitautien leviämistodennäköisyys kasvaa (Lilja ym. 2010). Lisääntyvillä luontaisilla häiriöillä on positiivinen vaikutus sekä kuolleen puun, runsaslahopuustoisten nuorten suk-

kessiovaiheiden, että lehtipuun määrään. Ilmaston lämmitessä lahoamisnopeuden kasvu voi puolestaan vähentää lahoppuun määrää (Weslien ym. 2009; Mazziotta ym. 2014; Mazziotta ym. 2016).

4.2

## **Ilmastonmuutoksen ja maankäytön aiheuttamat riskit Natura-alueiden direktiiviluontotyyppien esiintymille**

Suojelualueilla on keskeinen merkitys luontotyyppien ja niihin liittyvän monimuotoisuuden turvaamisessa muuttuvassa ilmastossa. Nopeasti muuttuvassa ilmastossa luontotyyppien altistuminen, etenkin altistumisen voimakkuus eri alueilla, sekä toisaalta niiden sopeutumiskyky muutokseen nousevat tärkeiksi tutkimusteemoiksi. Luontotyyppien altistumisen lisäksi on tarpeen tarkastella, miten ihmistoiminta sekä suojelualueiden sisällä (mm. luonnonhoito ja ennallistaminen) että niiden ulkopuolella (maankäyttöpaineet) tukee tai heikentää ilmastonmuutokseen sopeutumista.

SUMI-hankkeessa selvitetään, minkälainen riskitekijä ilmastonmuutos on Natura-alueilla oleville Luontodirektiivin liitteen I luontotyyppien esiintymille ja minkälaisia maankäyttöön liittyviä paineita esiintymiin kohdistuu. Työssä tehdään laajamittainen arviointi luontotyyppien haavoittuvuudesta ilmastonmuutokselle pitkälti samoilla kriteereillä kuin direktiivilajien esiintymille (ks. luku 3.3.).

Tarkastelussa on mukana 53 maaympäristöjen luontotyyppiä, jotka ovat mukana luontodirektiivin liitteessä I. Luontotyyppien esiintymäpaikkatiedot Natura-alueilla poimittiin tarkastelua varten Metsähallituksen biotooppikuvioaineistosta (SAKTI).

Arvioinnin tavoitteena on tarkastella seitsemän ilmastomuuttujan (lämpösomma, tammikuun keskilämpötila, keskimääräinen vesitase, heinäkuun keskilämpötila, loppukevään/alkukesän keskilämpötila, keskimääräinen vesitaseen määrä ja keskimääräinen lumisateen määrä) suhteellista muutosta nykytilaan (1981-2010) verrattuna. Analyysissä käytetään kahta päästöskenaariota (RCP4.5 ja RCP8.5) ja kahta tulevaisuuden ajanjaksoa (2040-2069 ja 2070-2099). Altistumista ilmastonmuutokselle voidaan tarkastella luontotyypeittäin joko esiintymäkohtaisesti tai tyypeittäisinä yhteenvetoina.

Luontotyyppiesiintymän ympäristön maankäyttö voi joko heikentää esiintymän tilaa (esimerkiksi rajautuminen kuivattaviin ojituksiin, hakkuualueisiin tai peltoihin) tai tukea sen säilymistä (esimerkiksi rajautuminen muuhun suojeltuun alueeseen tai ojitattomiin soihin). Maankäyttöä tarkasteltiin sekä esiintymän lähiympäristössä (200 metrin vyöhyke esiintymän ympärillä) että maisematasolla (1 km ja 3 km vyöhykkeet). Lähiympäristön maankäyttöanalyysissä käytettiin seuraavia aineistoja: Corine2018 maanpeiteaineisto, Global Forest Watch -aineisto, Metsäkeskuksen harvennushakkuuaineisto, suojelualueverkosto (sisältäen Natura-alueiden lisäksi myös muut suojelualueet), SUMI-hankkeeseen koostettu metsäaineisto (puuston volyyymi, läpimitta, ikä, pohjapinta-ala, korkeus sekä pääpuulaji) ja soiden ojitusaineisto. Maisematason analyysissä käytettiin edellisten lisäksi tarkastelua varten luotua ihmispaine -aineistoa (yhdistetty tietoa Tilastokeskuksen väestöruutuaineistosta, MML:n maastotietokannan rakennukset -aineistosta sekä Väyläviraston Digiroad -aineistosta).

Natura-alueiden luontotyyppiesiintymien altistumista ilmastonmuutokselle tarkastellaan tässä loppuraportissa esimerkinomaisesti kahdella luontotyyppillä. Tulokset tullaan esittämään laajemmin valmistella olevassa tieteellisessä julkaisussa (Aapala ym. julkaisematon). Tarkastelun lähtökohtana on kunkin ilmastomuuttujan nykyhetken (1981-2010) arvojen vaihteluväli, joka sisältää luontotyyppin kaikki esiintymät Natura-verkostossa. Esimerkiksi vesitaseen arvot 182 – 447 mm kattavat Natura-alueiden aapasoiden nykyiset esiintymät. Tätä voidaan siten pitää aapasoi-

den esiintymiselle suotuisana vesitaseen vaihteluvälinä. Ennustettujen muutosten perusteella voidaan tarkastella esimerkiksi, kuinka suuri osa aapasoiden esiintymistä sijaitsee tulevaisuudessa vesitaseen suhteen suotuisalla alueella ja missä mahdollisesti epäsuotuisat alueet sijaitsevat (kuvat 7a-d). Tulosten perusteella valtaosa (yli 95 % molemmilla skenaarioilla ja molempina tulevaisuuden ajanjaksoina) Natura-alueiden aapasuoesiintymistä sijaitsee alueilla, joilla vesitase säilyy tulevaisuudessakin niille suotuisana. Epäsuotuisimmat alueet sijoittuvat Länsi-Suomen rannikkoalueelle. Siellä erityisesti voimakkaimman lämpenemisskenaarion mukaisessa ennusteessa laajoilla alueilla olosuhteet muuttuvat tulevaisuudessa aapasoille epäsuotuisiksi; ennustettu tulevaisuuden vesitase on nykytilanteen arvoja alempi, mikä ilmentää muutosta kuivempaan suuntaan (kuva 7d). Myös Inarin Lappiin muodostuu ennusteen mukaan alue, jossa vesitaseen arvot olisivat epäsuotuisia Natura-alueiden aapasoille (kuvat 7b-d).

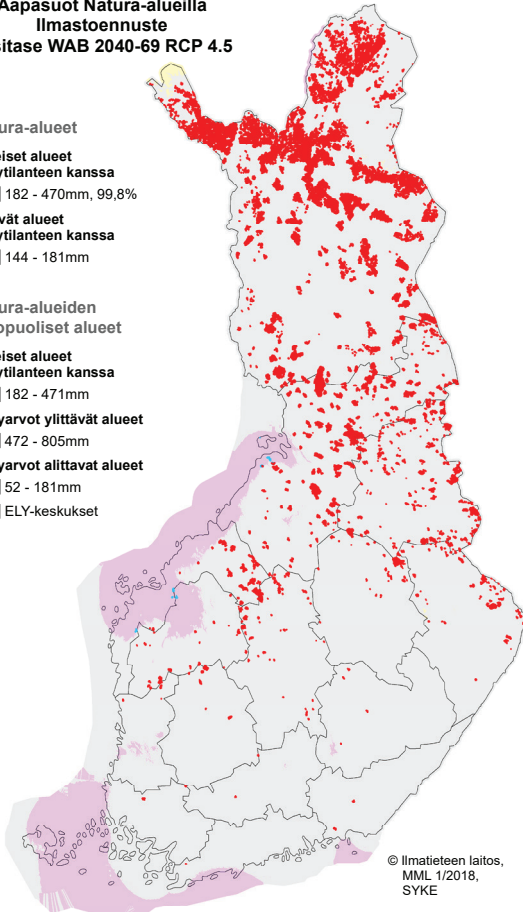
Vastaavalla analyysillä tarkasteltiin Natura-alueiden lehtoesiintymiä suhteessa lämpösumman muutokseen (kuva 8). Natura-verkoston lehtoja esiintyy nykytilanteessa lämpösumman vaihteluvälillä 501 - 1 494 °Cvrk. Ennusteen perusteella lämpösummat nousevat Etelä-Suomessa jo vuosisadan puolivälissä molemmissa skenaarioissa selvästi korkeammiksi kuin nykyesiintymillä (kuvat 8a-d). Voimakkaimman skenaarion mukaan vuosisadan lopulla lämpösummat olisivat jo Etelä-Lappia myöten nykyistä vaihteluväliä korkeampia. Lämpötilan nousun oletetaan olevan suotuisa lehtokasvillisuudelle, joten nykyistä korkeampien lämpösummien voi olettaa parantavan Natura-alueiden lehtojen olosuhteita. Samalla lämpenevä ilmasto mahdollistaa lehtokasvivyhteisöjen kehittymisen uusille suotuisille paikoille aiempaa pohjoisempana, joskin uusien lehtojen muodostuminen voi tapahtua ilmastonmuutokseen nähden viiveellä ja riippuu merkittävästi myös kasvilajien uusille alueille siirtymisen mahdollisuuksista maisemamatriisissa sekä lajikohtaisista eroista leviämiskyvyssä.



**a) Aapasuot Natura-alueilla  
Ilmastoennuste  
Vesitase WAB 2040-69 RCP 4.5**

**Natura-alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
■ 182 - 470mm, 99,8%  
Eriävät alueet nykytilanteen kanssa  
■ 144 - 181mm

**Natura-alueiden ulkopuoliset alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
□ 182 - 471mm  
Nykyarvot ylittävät alueet  
■ 472 - 805mm  
Nykyarvot alittavat alueet  
■ 52 - 181mm  
□ ELY-keskukset

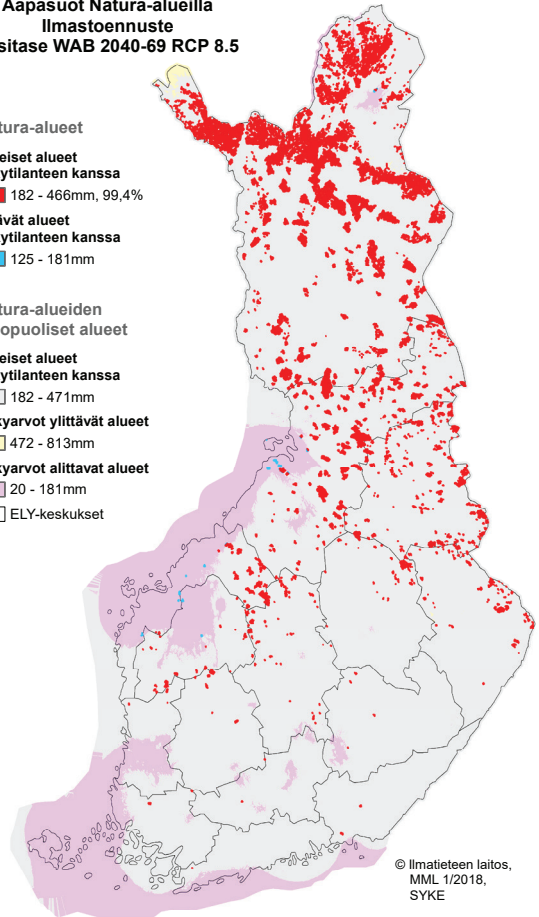


© Ilmatieteen laitos,  
MML 1/2018,  
SYKE

**b) Aapasuot Natura-alueilla  
Ilmastoennuste  
Vesitase WAB 2040-69 RCP 8.5**

**Natura-alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
■ 182 - 466mm, 99,4%  
Eriävät alueet nykytilanteen kanssa  
■ 125 - 181mm

**Natura-alueiden ulkopuoliset alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
□ 182 - 471mm  
Nykyarvot ylittävät alueet  
■ 472 - 813mm  
Nykyarvot alittavat alueet  
■ 20 - 181mm  
□ ELY-keskukset

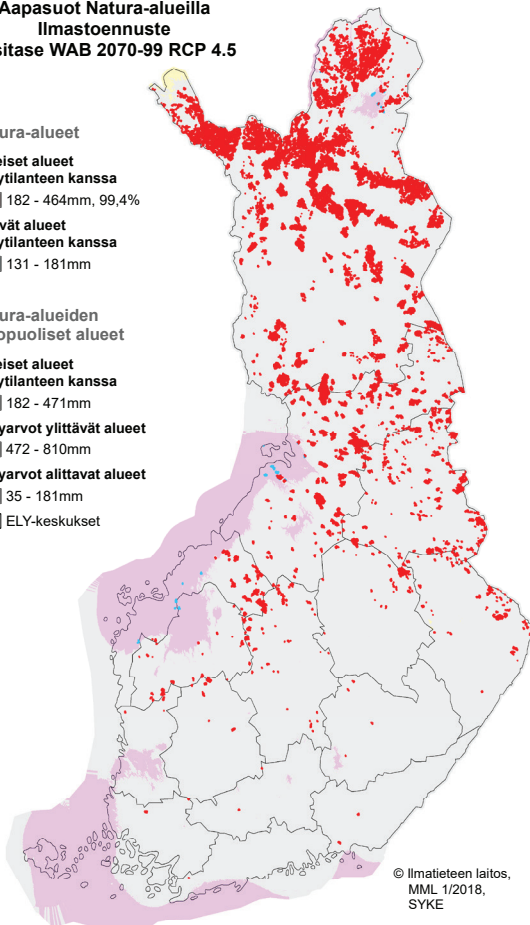


© Ilmatieteen laitos,  
MML 1/2018,  
SYKE

**c) Aapasuot Natura-alueilla  
Ilmastoennuste  
Vesitase WAB 2070-99 RCP 4.5**

**Natura-alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
■ 182 - 464mm, 99,4%  
Eriävät alueet nykytilanteen kanssa  
■ 131 - 181mm

**Natura-alueiden ulkopuoliset alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
□ 182 - 471mm  
Nykyarvot ylittävät alueet  
■ 472 - 810mm  
Nykyarvot alittavat alueet  
■ 35 - 181mm  
□ ELY-keskukset

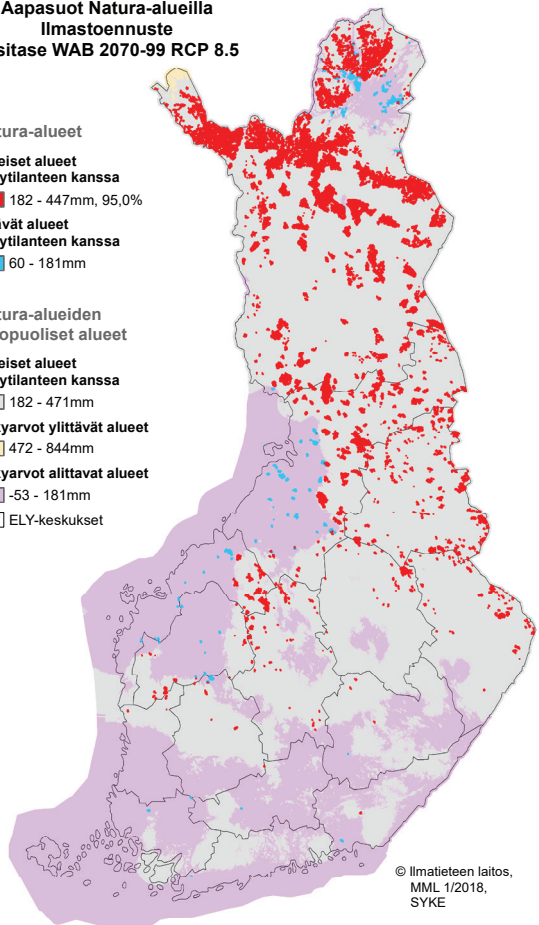


© Ilmatieteen laitos,  
MML 1/2018,  
SYKE

**d) Aapasuot Natura-alueilla  
Ilmastoennuste  
Vesitase WAB 2070-99 RCP 8.5**

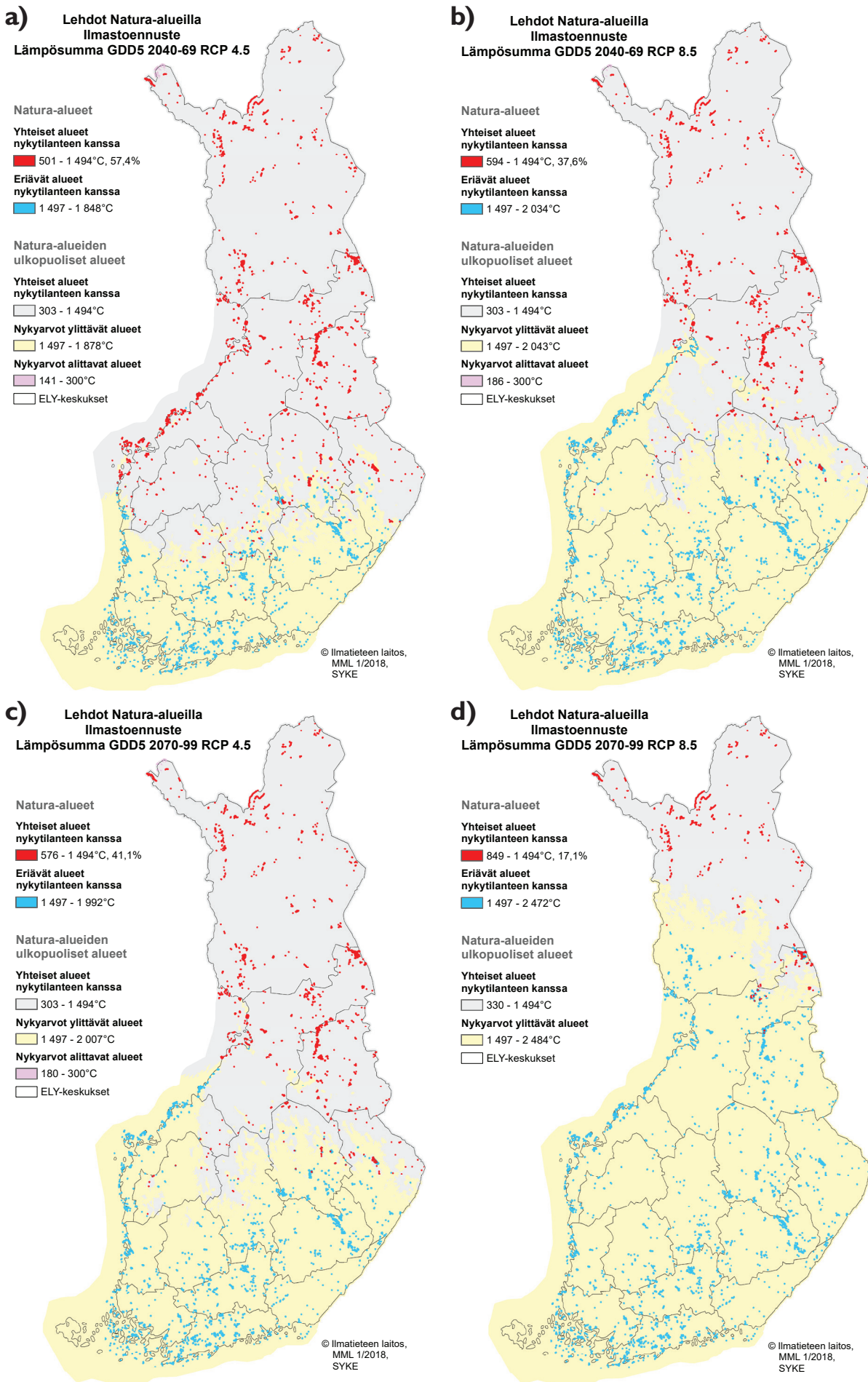
**Natura-alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
■ 182 - 447mm, 95,0%  
Eriävät alueet nykytilanteen kanssa  
■ 60 - 181mm

**Natura-alueiden ulkopuoliset alueet**  
Yhteiset alueet nykytilanteen kanssa  
□ 182 - 471mm  
Nykyarvot ylittävät alueet  
■ 472 - 844mm  
Nykyarvot alittavat alueet  
■ -53 - 181mm  
□ ELY-keskukset



© Ilmatieteen laitos,  
MML 1/2018,  
SYKE

**Kuva 7.** Natura-alueiden aapasuoesiintymät suhteessa ennustettuun muutokseen vesitaseessa (WAB) ajanjaksoilla 2040-69 ja 2070-91 ja kahdella eri skenaariolla (RCP 4.5 ja RCP 8.5). Esitysteknisistä syistä aapasuokuvia on liioiteltu 20-kertaisiksi.



**Kuva 8.** Natura-alueiden lehtosiintymät suhteessa ennustettuun muutokseen lämpösommassa (GDD5) ajanjaksoilla 2040-69 ja 2070-91 ja kahdella eri skenaariolla (RCP 4.5 ja RCP 8.5). Esitysteknisistä syistä lehtokuvia on liioiteltu 30-kertaisiksi.

## Ennallistaminen ja luonnonhoito tukevat sopeutumista ilmastonmuutokseen

### Miten ilmastonmuutos vaikuttaa ja miten se tulisi ottaa huomioon ennallistamis- ja luonnonhoitotöissä ja niiden kohdentamisessa

Ennallistaminen ja luonnonhoito ovat vakiintuneet osaksi luonnon monimuotoisuuden turvaamisen keinovalikoimaa. Niiden arvioidaan olevan avainasemassa myös tulevaisuudessa, etenkin alueilla missä ilmastonmuutos vahvistaa maankäytön aiheuttamia haitallisia muutoksia. Ennallistamis- ja hoitotoimet ovat tarpeellisia myös tilanteissa, joissa ilmastonmuutos aiheuttaa uusia, osittain ennakoimattomia muutoksia (Harris ym. 2006; IPBES 2019; Diaz ym. 2019). Laadultaan heikentyneet elinympäristöt eivät pysty sopeutumaan ilmastonmuutokseen yhtä hyvin kuin luonnontilaiset tai luonnontilaisen kaltaiset elinympäristöt (Hopkins ym. 2007; Palmer ym. 2008). Muuttuvassa ilmastossa ennallistaminen ja luonnonhoito ovat siten keskeisiä keinoja, joita tarvitaan lajien elinympäristöjen ja luontotyyppien tilan parantamiseksi ja niiden vastustus- ja sopeutumiskyvyn vahvistamiseksi ja ylläpitämiseksi (Palmer ym. 2008; Perry ym. 2015; Timpone-Padgham ym. 2017; IPBES 2018; IPBES 2019; Diaz ym. 2019).

Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan myös luonnontilaisiin elinympäristöihin. Siksi esimerkiksi Harris ym. (2006) painottavat, että ennallistamisen tavoitteita ei voi enää tiukasti sitoa johonkin täsmälliseen alkuperäiseen historialliseen luonnontilaan, vaan tavoitteiden asettelussa tulee kiinnittää huomiota erityisesti ekosysteemien toimintaan ja prosesseihin. Meillä Suomessa elinympäristöjen ennallistamisen ja luonnonhoidon tavoitteita ei ole sidottu tiukasti tiettyyn lajikoostumukseen tai lajien runsaussuhteisiin, vaan tavoitteena on ollut toimivien suoekosysteemien tai luonnontilaisen metsän tai virtaveden rakennepiirteiden palauttaminen (Ahola & Havumäki 2008; Similä & Junninen 2011; Aapala ym. 2013). Kun elinympäristön toiminnalliset ja rakenteelliset ominaispiirteet palautuvat, myös lajistolla on mahdollisuus palautua tai siirtyä uusille, ennallistetuille alueille. Nämä periaatteet ovat myös tulevaisuuden muuttuvassa ilmastossa toimiva lähtökohta ennallistamiselle ja luonnonhoidolle.

Toistaiseksi kehitetyt ja käytetyt ennallistamisen ja luonnonhoidon menetelmät ovat pääosin hyvin toimivia, myös ilmaston muuttuessa (Aapala ym. 2018). Olenaista on kohdentaa toimenpiteet nykyistä paremmin siten, että otetaan huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat uhkat. Yksi keskeinen näkökulma on, miten ennallistamista ja luonnonhoitoa suojelualueiden ulkopuolella tulisi kohdentaa, niin että se parhaiten tukisi lajien siirtymistä muuttuvassa ilmastossa.

### Asiantuntijatyöpajassa pohdittiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia ennallistamiseen ja luonnonhoitoon

SUMI-hanke järjesti marraskuussa 2018 yhteistyössä Ennallistamisen ja luonnonhoidon ohjausryhmän (ELO), Suomen ympäristökeskuksen, Metsähallituksen Luontopalvelujen ja ympäristöministeriön kanssa asiantuntijatyöpajan, jossa pohdittiin varautumista ilmastonmuutokseen ennallistamis- ja luonnonhoitotyössä (Aapala ym. 2018). Työpajassa keskusteltiin metsien, soiden, sisävesien ja perinnebiotooppien ennallistamisen ja hoidon kohdentamisesta, menetelmistä, vaikutuksista ja tietotarpeista muuttuvassa ilmastossa. Lisäksi pohdittiin keinoja ilmastoviisaan elinympä-

ristöjen ennallistamisen ja luonnonhoidon valtavirtaistamiseen ja siihen liittyvän viestinnän ja rahoituksen edistämiseen.

Metsien ilmastoviisas ennallistaminen ja luonnonhoito keskittyvät jatkossa entistä laajempien kokonaisuuksien suunnitteluun ja toteutukseen. Ilmastomuutoksen näkökulmasta ennallistamisen ja luonnonhoidon tavoitteet voivat vaihdella alueellisesti: Keski- ja Pohjois-Suomi ovat tärkeitä havumetsälajiston leviämisalueita, Etelä-Suomessa korostuvat lehdot ja muut arvokkaat eteläiset laji- ja elinympäristökätkitymät. Ennallistamisen tavoitteissa hiilensidonnan ja -varastoinnin edistäminen nousevat monimuotoisuuden turvaamisen rinnalle. Talousmetsien luonnonhoidossa korostuvat metsien luontaista häiriödynamiikkaa ja peitteisyyttä lisäävät toimet, kuten kiertoajan pidennys ja eri-ikäisrakenteinen metsänkasvatus. Lisäksi tarvitaan aktiivista lehtojen ja jalopuumetsien luomista. Ilmastomuutos voi myös tukea ennallistamisen ja luonnonhoidon tavoitteita, jos lisääntyvät häiriöt ja metsäpalot opitaan hyödyntämään lahoppuun ja kulutuksista riippuvaisten lajien elinolosuhteiden parantamisessa. (Aapala ym. 2018)

Soiden ennallistamisen lähtökohtana on muuttuvassa ilmastossakin syytä pitää valuma-alueita ja hydrologisia kokonaisuuksia. Yleisluonteinen keskeinen tavoite on toimivan suoekosysteemin palautuminen. Suoekosysteemien ja suolajiston sopeutumista ilmastomuutokseen tukee laajojen, hyvin kytkeytyneiden kokonaisuuksien kehittäminen, jolloin luontaiset prosessit voivat palautua ja lajeilla on mahdollisuus siirtyä uusille alueille ilmaston lämmetessä. Ilmaston muuttuessa ennallistamisen ja luonnonhoidon merkitys korostuu erityisesti aapasoilla ja muilla minerotrofisilla rimpisoilla, letoilla ja lettonevoilla sekä suoniityillä. Muuttuvien sääolojen vuoksi tarvitaan uusia ja kevyempiä ennallistamismenetelmiä ja nykyisten menetelmien sopeuttamista. Talvien lämpenemisen ja roudattomuuden vuoksi nykyiset koneet ovat liian raskaita mikä vaikeuttaa ojien tukkimista, patojen tekemistä ja puun korjuuta. Kesien kuivuminen edellyttää, että ojat tukitaan kunnolla, jotta vesitalous voi palautua. Toisaalta varautuminen kesäisiin rankkasateisiin ja sadetulviin edellyttää myös, että padoista ja muista rakenteista tehdään kestäviä. (Aapala ym. 2018)

Sisävesien ilmastoviisaassa hoidossa on kyse ilmastomuutokseen sopeutumisesta. Ilmastomuutokseen sopeutuminen nostaa esiin uusien menetelmien ja toimintatapojen kehittämistarpeen, vaikka valuma-alueiden ja sisävesien ennallistamisen ja luonnonhoidon perinteiset menetelmät ovat pääosin edelleen käyttökelpoisia. Kunnostustoimien toteuttaminen laajemmin valuma-alueilla yksittäisten kohteiden sijasta tehostaa merkittävästi vaikuttavuutta myös muuttuvassa ilmastossa. Vedenpidätyskyvyn parantamiseen tähtäävät toimenpiteet ovat tärkein keino sopeutumisessa. Niillä voidaan vaikuttaa muuttuneiden ilmasto-olojen vaikutuksesta yleistyneeseen kesäaikaiseen kuivuuteen ja toisaalta talvisiin tulviin, lisääntyneeseen ravinnekuormitukseen sekä sedimentaatioon. Erilaisia sisävesien ranta-alueiden hoitotapoja (esim. tulvittaminen, rantapuuston istuttaminen) pitää kehittää siten, että vedenpidätyskyvyn parantaminen huomioidaan nykyistä paremmin. (Aapala ym. 2018)

Uhanalaisten perinnebiotooppien tilan parantamiseksi on paljon tehtävää myös muuttuvassa ilmastossa. Rannikkoalueiden vedenpinnan on ennakoitu nousevan ilmastomuutoksen myötä ja rannikon perinnebiotooppien hoitoa tuleekin kohdentaa riittävän laajoihin kokonaisuuksiin, rantaniittyjen lisäksi yläpuolisille kuivan maan niitty- ja peltoalueille. Kasvukauden pidentyessä puuston ja pensaiden kasvu lisääntyy, mikä lisää perinnebiotooppien umpeenkasvua. Pysyvän jääpeitteen muodostuminen vähentyy, eivätkä jäät enää tuo laaja-alaisia häiriöitä rantojen ruovikkoihin ja pensaikkoihin. Tämä lisää perinnebiotooppien hoidon, kuten niiton, niittokertojen, laidunnuksen ja tehostetun biomassan poiston tarvetta. Äärimmäisten kuivien / märkien laidunkausien varalta tarvitaan myös varalaitumia sekä joustoa totuttuihin hoitomuotoihin. (Aapala ym. 2018)



### Ilmastonmuutos osaksi ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelua

Ennallistamista ja luonnonhoitoa tarvitaan tulevaisuudessa joka tapauksessa maankäytön aiheuttamien luontoympäristöjen heikennysten korjaamiseksi, mutta ilmastonmuutos tuo työhön lisää haasteita. Ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelussa on tarpeen ottaa huomioon ilmastonmuutoksen tuoma epävarmuus. Siinä missä maankäytön aiheuttamien muutosten suunta ja usein suuruuskin tiedetään tai osataan arvioida, ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin liittyy epävarmuutta sekä muutoksen ajoittumisen, suuruuden, suunnan että nopeuden suhteen. Tietoa kertyy kuitenkin koko ajan lisää.

Keskeisiä haasteita tulevaisuudessa on tunnistaa ne käytännön ennallistamis- ja luonnonhoidon tilanteet, joissa olisi varauduttava ilmastonmuutoksen mukanaan tuomiin muutoksiin. Tähän tarvitaan tueksi tietoa lajien ja luontotyyppien haavoittuvuudesta ilmastonmuutokselle (ks. luvut 1-3). Ilmastonmuutos voi myös aiheuttaa hoitotarpeita joissakin uusissa elinympäristöissä tai joillekin uusille lajeille tai lajiryhmille, jotka pitäisi huomioda ennallistamisen ja luonnonhoidon kohdentamisessa. Käytännön hoito- tai ennallistamismenetelmiä voi olla tarpeen sopeuttaa uudelleen olosuhteisiin ja kehittää tarvittaessa uusia menetelmiä. Lisäksi tarvitaan lisää tietoa siitä, mikä on ennallistamisen ja luonnonhoidon rooli ilmastonmuutoksen hillinnän ja/tai sopeutumisen keinona, ja mitkä ovat toiminnan omat ilmastovaiikutukset.

Ilmastonmuutos tulee ottaa osaksi ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelua sekä suojelualueilla että suojelualueiden ulkopuolella. Tulevaisuudessa myös seurannan merkitys korostuu entisestään osana sopeutuvaa ennallistamista ja luonnonhoitoa.

## 5 Luonnontilaisten metsien hiilitase

*Rakenteeltaan monimuotoiset metsät ovat avainasemassa metsien ekosysteemipalveluiden ja sopeutumiskyvyn turvaamiseksi voimistuvan maankäytön ja ilmastonmuutoksen paineissa. Luonnontilaisten metsien toiminnan ymmärtäminen on tärkeää, jotta voidaan ennustaa metsien käytön vaikutuksia hiilensidontaan ja lahoppaan määrään muuttuvassa ympäristössä. SUMI-hankkeessa kehitettiin laskentamenetelmää, jonka avulla voidaan arvioida metsän käsittelytapojen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsien hiilitaseeseen tarkalla spatiaalisella resoluutiolla. Alustavien tulosten mukaan luonnontilaisten metsien hiilensidontakyky säilyy myös niiden ikääntyessä. Yhdistämällä hiilitasearviot luonnon monimuotoisuutta kuvaaviin paikkatietoaineistoihin voidaan priorisoida sekä ilmastohyödyiltään että luontoarvoiltaan parhaita kohteita suojelualuesuunnittelussa.*

### 5.1

#### **Mitä luonnontilaisten metsien hiilitaseesta tiedetään?**

Luonnontilaiset metsät tarjoavat elinympäristöjä uhanalaisille metsälajeille ja säätelevät ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta varastoimalla ja sitomalla hiiltä. Varsinkin vanhoissa metsissä on paljon hiiltä varastoituneena biomassaan, kuolleeseen puuhun ja maaperään (Kurz ym. 2013, Aakala 2010). Metsien kyky tuottaa näitä ekosysteemipalveluita on uhattuna ilmastonmuutoksen ja maankäytön muutosten seurauksena (Lindner ym. 2010, Bradshaw ym. 2009). Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen lisää paineita tehostaa metsien käyttöä uusiutuvien raaka-aineiden ja energian tuottamiseksi Suomessa (Suomen biotalousstrategia 2014). Lisäksi ilmastonmuutoksen on havaittu tihentävän ja voimistavan sään ääri-ilmiöitä ja boreaalisen metsän luonnollisia häiriöitä, kuten myrskyjä ja metsäpaloja (Thom & Seidl 2016). Yhdessä nämä muutokset kasvattavat nuorten metsien pinta-alaa myöhäisen sukkessiovaiheen metsien kustannuksella (Kuuluvainen & Gauthier 2018), jolloin metsien monimuotoisuus ja hiilensidontakyky voivat heikentyä.

Hakkuiden määrä vaikuttaa metsän hiilivaraston muutokseen. Puuston hiilivarasto kasvaa, kun talousmetsän kiertoaika pidennetään tai metsä suojellaan. Vanhojen, luonnontilaisten metsien kasvu ja hiilensidonta tunnetaan kuitenkin huonosti, mikä aiheuttaa epävarmuutta metsien hiilitaseen ennustamiseen muuttuvassa ympäristössä. Metsäinventointien mukaan tasaikäisten metsiköiden runkopuun biomassan kasvu hidastuu metsikön ikääntymisen myötä boreaalisella ja lauhkealla vyöhykkeellä (Hopkinson ym. 2016). Kasvun hidastuminen ei mittausten mukaan johdu puuaineen hengityksen kasvusta, kuten aikaisemmin ajateltiin (Kira & Shidei 1967). Sen sijaan kasvun allokaatio runkopuuhun pienenee, kun puut huolehtivat elintärkeiden lehtien ja juuriston uusiutumisesta (Ryan ym. 2004, Mäkelä & Valentine 2001). Myös typen määrän on havaittu vähenevän metsikön ikääntyessä kylmissä ilmastoissa, mikä voi hidastaa kasvua (Gower ym. 1996). Lisäksi metsikön latvuserroksen sulkeutuminen ja populaatorakenteen muutokset heikentävät metsikön valonsaantia



ja tuotoskykyä (Binkley ym. 2001, Smith & Long 2001). Luonnonmetsän kuolleisuus ja uusien taimien syntyminen pienaukkoihin ovat vielä huonosti tunnettuja ilmiöitä (esim. Peltoniemi ym. 2011).

Eri ikäisten boreaalisten metsien hiilensidontaa on mitattu eddy covariance (EC) menetelmällä (esim. Hopkinson ym. 2016, Peichl ym. 2010, Kolari ym. 2004). Mittaustulokset viittaavat siihen, että myös iäkkäät metsät toimivat hiilen nieluina. Mittausten mukaan sekä fotosynteesi että nettoprimäärituotanto kuitenkin laskevat jonkin verran metsikön ikääntyessä, koska juurten ja lehtien respiraatio kasvaa (Zha ym. 2009). Aluskasvillisuuden merkitys metsäekosysteemin hiilen kierrossa tunnetaan vielä huonosti, mikä aiheuttaa epävarmuutta hiilitasearvioihin. Perinteisesti vanhassa metsässä maaperän hiilivaraston on ajateltu olevan tasapainotilassa (Odum 1969). Tällöin puuston ja aluskasvillisuuden kariketuotannon ja maaperän orgaanisen aineen hajotus ovat yhtä suuret. Viimeaikaisten tutkimusten mukaan maaperän hiilensidonta voi kuitenkin jatkua myös hyvin vanhoissa metsissä, mikä johtuu todennäköisesti lehtien ja juurten jatkuvasta kariketuotannosta (Hopkinson ym. 2016, Luysaert ym. 2008, Zhou ym. 2006). Ilmaston lämpeneminen, kasvukauden pidentyminen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvun on ennustettu lisäävän pohjoisten ekosysteemien tuottavuutta (Ciais ym. 2019). Toisaalta syksyjen lämpeneminen voi kiihdyttää maaperän orgaanisen aineen hajotusta, mikä pienentäisi metsäekosysteemin hiilinielua (Liu ym. 2019). Kaiken kaikkiaan ilmastonmuutoksen vaikutukset metsien hiilinieluihin ovat vielä epävarmoja varsinkin paikallisessa ja alueellisessa mittakaavassa (Kalliokoski ym. 2018).

## 5.2

### Metsän hiilitaseen laskentamenetelmä

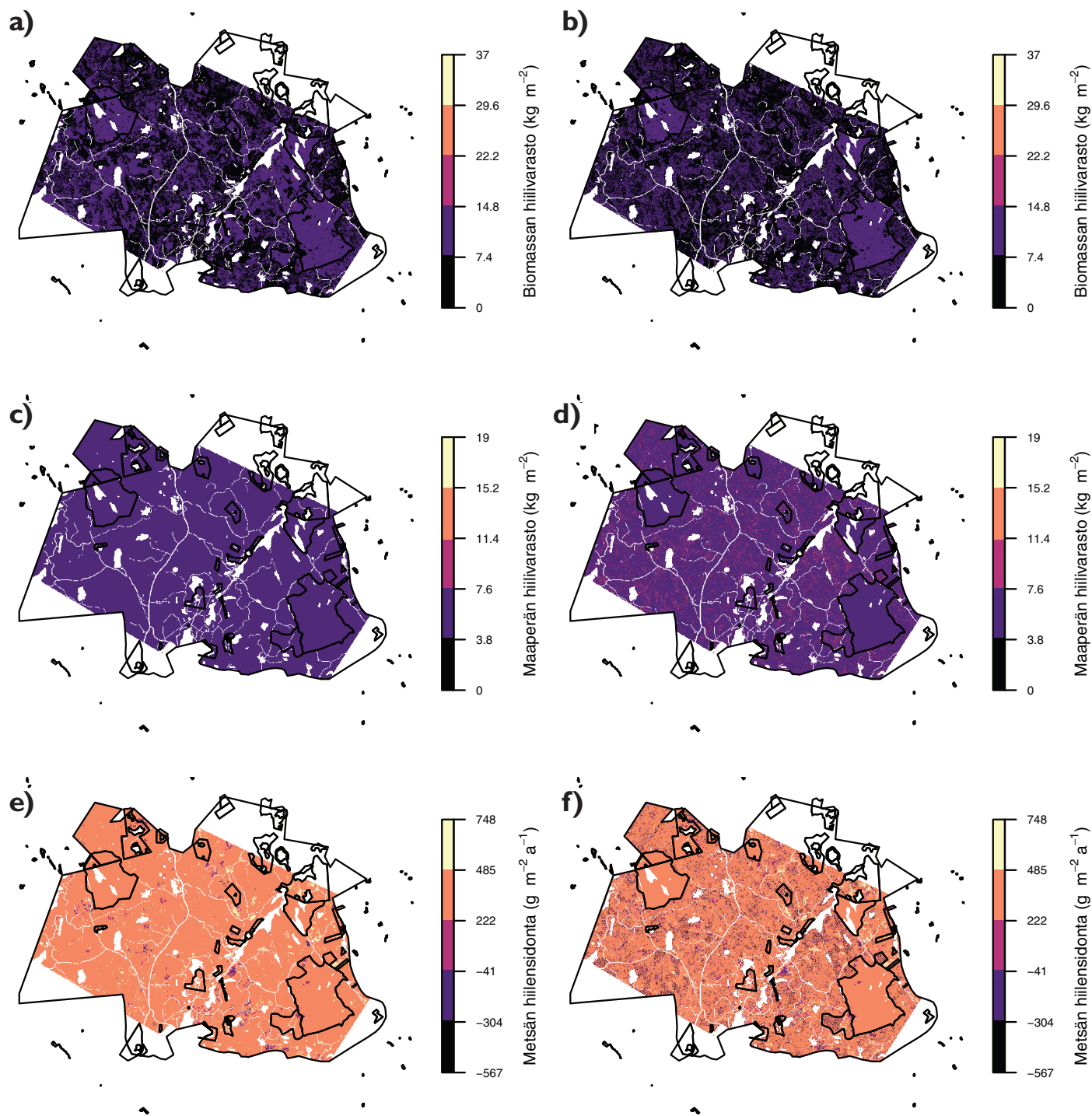
Vanhojen metsien hiilensidontakykyä nyt ja muuttuvassa ympäristössä voidaan tutkia prosessipohjaisilla malleilla (Mäkelä ym. 2000). SUMI-hankkeessa kehitettiin vuosien 2017-2019 aikana laskentamenetelmää, jonka avulla voidaan arvioida metsän käsittelytapojen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsien hiilitaseeseen tarkalla spatiaalisella resoluutiolla. Laskentamenetelmää testattiin metsäisillä suojelualueilla ja niitä ympäröivissä talousmetsissä. Lisäksi hankkeen aikana koottiin mittaustuloksia uhanalaiselle lahopuulajistolle tärkeiden vanhojen metsien kasvusta, kuolleisuudesta ja uudistumisesta. Kootun aikasarja-aineiston avulla luonnontilaisten metsien hiilen kierrosta voidaan muodostaa nykyistä tarkempi käsitys. Yhdistämällä hiilitasearviot luonnon monimuotoisuutta kuvaaviin paikkatietoaineistoihin voidaan priorisoida sekä ilmastohyödyiltään että luontoarvoiltaan parhaita kohteita suojeluesuunnittelussa (Thomas ym. 2013).

Tässä esitellään alustavia tuloksia metsän simuloidusta hiilitaseesta Kanta-Hämeessä Evon luonnonsuojelualueella, jossa kasvaa varttunutta ja vanhaa kuusivaltaista metsää. Alueen metsät ovat pääosin Natura SAC-alueita ja suojeltuja aarnialueita. Metsien keski-ikä oli 57 vuotta vuonna 2013 laskennan lähtötietona käytetyn Luonnonvarakeskuksen valtakunnan metsien inventoinnin monilähdeaineiston (MVMI) perusteella. Metsien kehitystä simuloitiin metsikön kasvua ja hiilitasetta kuvaavalla prosessipohjaisella PREBAS-mallilla eri metsänkäsittely- ja ilmastoskenaarioilla (Minunno ym. 2016, 2019). Metsänkäsittelyskenaarit olivat talousmetsä, jota käsiteltiin Tapion hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti ja suojeltu metsä, jossa ei tehty lainkaan harvennus- tai uudistushakkuita. Suojelluilla aarnialueilla ei tehty lainkaan hakkuita kummassakaan skenaarissa. Tässä tarkastellaan metsän hiilitasetta RCP4.5 ilmastoskenaariossa, jonka mukaan Suomen keskilämpötila nousee noin 3 astetta vuoteen 2100 mennessä globaalien kasvihuonekaasupäästöjen kohtuullisen rajoittamisen seurauksena (Ilmasto-opas 2019 b).

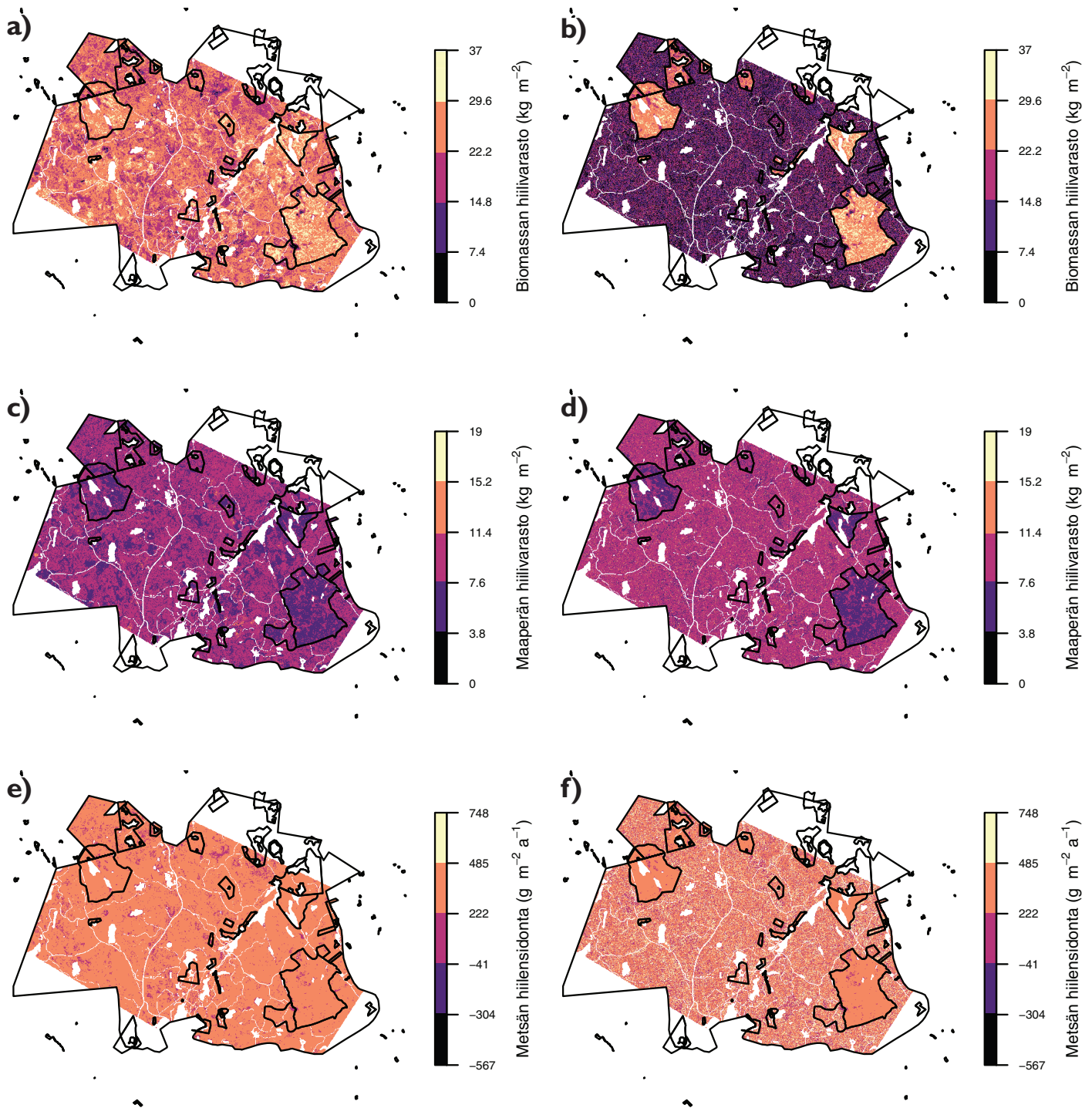
## Vanhan metsän hiilinielu säilyy

Alustavien simulointitulosten mukaan puuston ja metsämaan hiilivarasto kasvoi sekä suojelumetsä- että talousmetsäskenaariossa aikavälillä 2013–2099 (kuvat 9 ja 10 a-d). Luonnonmetsässä hiilivarastojen alueellinen jakauma oli tasaisempi kuin talousmetsässä, jossa hakkuut aiheuttivat pienipiirteistä vaihtelua. Suojelumetsässä oli merkittävästi suurempi keskimääräinen puuston hiilivarasto (kuva 10 a) mutta jonkin verran pienempi maaperän hiilivarasto (kuva 10 c) kuin talousmetsässä (kuva 10 b ja d) simulointijakson lopussa vuonna 2099. Puuston hiilivaraston kasvu johtuu yhtäältä ilmaston lämpenemisestä ja toisaalta puuston keski-ian kasvusta ja järeytymisestä etenkin suojelluissa metsissä. Simuloitu maaperän hiilivarasto sisälsi myös kuolleen puun. Malliarvioiden tarkentaminen vaatii luonnontilaisten metsien kuolleisuuden ja lahoppuun tuotannon nykyistä parempaa ymmärtämistä.

Metsän hiilensidonta pysyi melko vakaana simulointijakson 2013-2099 aikana sekä luonnonmetsä- että talousmetsä -skenaarioissa (kuvat 9 ja 10 e, f). Suojelumetsä (kuva 10 e) sitoi hiiltä puustoon ja maaperään keskimäärin hieman hitaammin kuin talousmetsä (kuva 10 f) simulointijakson lopussa 2069-2099, mutta säilyi kuitenkin hiilen nieluna koko tarkastelujakson ajan. Suojelumetsän puuston ikääntyminen oli todennäköinen syy hiilensidonnan hidastumiseen vuosisadan lopulla. Lisäksi on kuitenkin huomattava, että talousmetsässä hakkuissa poistuva hiili vähentää metsän kokonaishiilinielua, mitä ei tarkasteltu tässä työssä. Kaiken kaikkiaan tuloksissa havaitut erot johtuivat puuston kasvun, kuolleisuuden ja kariketuoannon välisistä eroista luonnonmetsä- ja talousmetsä -skenaarioissa. Metsikön iän vaikutukset näihin tekijöihin vaativat vielä lisää tutkimusta, jotta hiilitasearvioita voidaan tarkentaa. Jatkoselvityksissä on tärkeä arvioida sekä metsäisten suojelualueiden että niitä ympäröivien talousmetsien hiilensidontapotentiaalia muuttuvassa ilmastossa.



**Kuva 9.** Esimerkki mallinnetusta luonnonmetsän (vasen palsta) ja talousmetsän (oikea palsta) puuston hiilivarastosta (a, b), maaperän hiilivarastosta (c, d) vuonna 2017 ja metsän keskimääräisestä hiilensidonnasta (e, f) vuosina 2013-2018 Evon luonnonsuojelualueella Etelä-Suomessa ilmastokenaariolla RCP4.5. Alueen sisäpuolella sijaitsevilla vanhan metsän suojelualueilla ei tehty lainkaan hakkuita kummassakaan metsänkäsitelyskenaariossa. Metsä on hiilen nielu, kun hiilensidonta on positiivinen, ja lähde, kun se on negatiivinen.



**Kuva 10.** Esimerkki mallinnetusta luonnonmetsän (vasen palsta) ja talousmetsän (oikea palsta) puuston hiilivarastosta (a, b), maaperän hiilivarastosta (c, d) vuonna 2099 ja metsän keskimääräisestä hiilensidonnasta (e, f) vuosina 2069-2099 Evon luonnonsuojelualueella Etelä-Suomessa ilmastoskenaariolla RCP4.5. Alueen sisäpuolella sijaitsevilla vanhan metsän suojelualueilla ei tehty lainkaan hakkuita kummassakaan metsänkäsittelyskenaariossa. Metsä on hiilen nielu, kun hiilensidonta on positiivinen, ja lähde, kun se on negatiivinen.



## 6 Tietotarpeet

Tieto ilmastomuutoksen vaikutusten alueellisesta vaihtelusta voi merkittävästi auttaa luonnonsuojelualueiden suunnittelua. Sen avulla voidaan arvioida, miten ilmastolliset riskit jakaantuvat suojelualueverkoston eri osiin, mitkä alueet ja populaatiot altistuvat eniten ilmastomuutokselle, ja minne suojelualueiden ja lajien hoitotoimia tulisi kohdentaa. SUMI-hanketta seuraavissa ja täydentävissä tutkimuksissa olisi hyvä selvittää, millä alueilla suojelualueverkoston täydentäminen askelkivittyypillisillä suojelukohteilla auttaisi merkittävästi lajeja siirtymään uusille alueille; tämän tyyppiin analyysiin tässä hankkeessa tuotetut tarkan resoluution ilmastomuuttujien nopeustiedot antavat hyvän tietopohjan.

Jatkoanalyseissä on tarpeen tunnistaa (suoja)alueita, joissa ennustettu muutos on hitaampaa ja missä lajipopulaatiot voivat siten säilyä pidempään. Lisäksi on tarpeellista kytkeä nämä tarkastelut lajipopulaatioiden säilymiseen vaikuttaviin, lajien populaatiobiologisiin ja fysiologisiin ominaisuuksiin. Täydentävillä selvityksillä voidaan tarkentaa yksittäisillä suojelualueilla sijaitsevien lajipopulaatioiden ilmastollisia uhkatekijöitä ja niiden tulevaisuuden kehitystä, muun muassa arvioimalla suojelualueiden pienilmaston muuttumista kautta koko kuluvan vuosisadan nyt käytetyn yhden ilmastollisen vertailujakson (vuosijakso 2070–2099) sijaan. Tämänkaltaisen ilmastotrendien analyysi antaisi lisätietoa siitä, missä vaiheessa paikallisen ilmaston muuttumisessa tulee sellaisia kynnystilanteita (*tipping points*), joiden jälkeen lajipopulaatioiden säilyminen alkaa olla epätodennäköistä. Yksi merkittävä jatkoanalyysien tarve on syventää muuttuvan ilmaston piirteiden analyysiä siten että ne kattavat laajemman kirjon erilaisia ilmastotekijöitä. Etenkin kasvukauden ja lämpimimpien kesäkuukausien vesitaseen muutokset ovat yksittäinen tähän mennessä puutteellisesti tutkittu, mutta moneen eliölajiin ja lajiryhteyteen merkittävästi vaikuttava ekologinen tekijä. Etenkin suokasviyhteisöjen kohdalla tämän tyyppiset jatkotarkastelut olisivat hyödyllisiä.

Keskeisiä tulevaisuuden tutkimus- ja tietotarpeita ovat mm. (1) lajien runsauteen perustuvien mallien käyttö ennusteissa, (2) lajien sopeutumiskyky eli kyky välttää ilmastomuutoksen negatiivisia vaikutuksia sopeutumalla tai yksilöiden nopeamman siirtymisen avulla, (3) suojelualueita ympäröivän maisemamatriisin ja maankäytön merkitys, (4) suojelualueiden biogeofyysisten piirteiden merkitys lajeille. Runsausmallinnuksen avulla saataisiin huomattavasti nykyistä tarkempia ennusteita lajien esiintyvyydestä sekä voitaisiin paremmin arvioida lajien populaatioiden säilymistodennäköisyyttä ja kullekin lajille keskeisiä suojelualueita. Maankäyttö vaikuttaa merkittävästi myös suojelualueilla olevien lajien esiintymiseen, joten maankäytön ja ilmastomuutoksen yhteisvaikutuksen tutkiminen on keskeistä. Suojelualueiden ilmastollisten uhkien ja maankäytöstä johtuvien riskien ja paineiden analyysi tulisi laajentaa kattamaan myös Natura-alueverkoston ulkopuoliset suojelualueet, ja lajitason tarkastelu voidaan ulottaa kattamaan myös muut suojelullisesti arvokkaat lajit kuin direktiivilajit, kuten monet uhanalaiset lajit.

Lajien siirtyminen ja yksilöiden liikkuminen ilmaston muuttuessa voi helpottaa huomattavasti, mikäli suojelualueverkoston kytkeytyvyys on hyvä. Suojelualueiden kytkeytyvyyden merkityksestä, ja etenkin ennallistamisen ja luonnonhoidon roolista sen parantamisessa, tarvittaisiin lisää tutkimustietoa. Suojelualueiden topografia eli korkeusvaihtelu voi myös vaikuttaa lajien säilyvyyteen, sillä lajit säilyvät pisimpään topografisesti vaihtelevissa ympäristöissä, joissa ilmasto-olot muuttuvat hitaimmin. Alustavat SUMI-hankkeessa saadut tulokset pohjoisten metsälintujen populaatiomuutoksista suojelualueilla viittaavat topografisen vaihtelun hidastavan lintulajien populaatioiden taantumista ilmaston lämmitessä. Suojelualueiden pienipiirteisen topografisen vaihtelun merkitystä lajipopulaatioiden säilymiselle tulisikin tarkastella myös muilla eliöryhmillä. Erityisesti tulisi selvittää pienilmastoltaan poikkeavien refugoiden ja niiden elinympäristöjen maankäyttö ja suojelutilanne. Suojelualueiden ulkopuolisten paikkojen osalta tulisi arvioida niiden potentiaalista merkitystä lajeille ekologisten käytävien askelkivipaikkoina.

Lisää tutkimusta tarvitaan ilmastonmuutokselle herkimpien luontotyyppien sopeutumisesta muuttuviin olosuhteisiin ja monimuotoisuuden säilymisen turvaamiseksi tarvittavista toimita. Luontotyyppien altistumisesta, herkyydestä ja sopeutumiskyvystä ilmastonmuutokselle tiedetään vielä melko vähän. Luontotyyppien haavoittuvuusanalyysi asiantuntijatietoon tukeutuen voisi kuitenkin tuottaa systemaattisen, yhtenäisiin kriteereihin perustuvan arvion Suomen luontotyyppien herkyydestä ilmastonmuutokselle. Tieto tukisi esimerkiksi suojelualuesuunnittelua ja ennallistamis- ja luonnonhoitotoimenpiteiden kohdentamista.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia on tutkittu ensisijaisesti mahdollisimman luonnontilaisissa ympäristöissä, jotta ilmastonmuutoksen vaikutukset voitaisiin paremmin osoittaa. Luontotyyppisiin kohdistuu monenlaisia maankäyttöpaineita, joiden vuoksi niiden tila on heikentynyt (Kontula & Raunio 2018). Jos ilmastonmuutos vaikuttaa samansuuntaisesti, se voi vahvistaa maankäytön aiheuttamia haitallisia muutoksia. Jos ilmastonmuutoksen ja maankäytön vaikutukset ovat yhdessä suurempia kuin kumpikaan uhkatekijä yksinään, nykyiset suojelu- ja hoitostrategiat voivat olla riittämättömiä. Tietoa maankäytön ja ilmastonmuutoksen yhteisvaikutuksista tarvittaisiin kaikista luontotyypeistä. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia luontotyyppiin olisi hyvä tarkastella samanaikaisesti sille keskeisten tai tyyppillisten avainlajien, erityisesti kasvilajien, kanssa.

Luonnontilaisten metsien toiminnan ymmärtäminen on tärkeää, jotta voidaan ennustaa metsien käytön vaikutuksia hiilensidontaan ja lahoppuun määrään muuttuvassa ympäristössä. Mittausten mukaan metsikön ikääntyminen hidastaa puuston kasvua ja hiilensidontaa. Kasvun hidastumisen taustalla olevien puiden fysiologiaan ja metsikön rakenteeseen liittyvien syiden selvittäminen vaatii kuitenkin lisää tutkimusta. Luonnontilaisen metsän sukkessio poikkeaa talousmetsän kehityksestä. Erityisesti luonnontilaisten metsien kuolleisuus ja uusien taimien syntyminen pienaukoihin ovat vielä huonosti tunnettuja ja malleissa puutteellisesti kuvattuja ilmiöitä. Lisäksi aluskasvillisuuden merkitys metsäekosysteemin hiilen kierrossa tunnetaan huonosti, mikä aiheuttaa epävarmuutta hiilitasearvioihin. Ilmaston lämpeneminen, kasvukauden pidentyminen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu saattavat lisätä pohjoisten metsien kasvua. Toisaalta syksyjen lämpeneminen voi kiihdyttää maaperän orgaanisen aineen hajotusta, mikä pienentäisi metsän hiilinielua.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäekosysteemien toimintaan ovat epävarmoja varsinkin paikallisessa ja alueellisessa mittakaavassa. Tulevaisuudessa voitaisiin selvittää esimerkiksi suojelualueiden pienilmaston muutosten vaikutuksia puuston kasvuun ja hiilensidontaan. Tämän hankkeen aikana koottiin mittaussaineistoa uhanalaiselle lahoppulajistolle tärkeiden vanhojen metsien kasvusta, kuolleisuudesta ja uudistumisesta. Kootun aikasarja-aineiston avulla luonnontilaisten metsien hiilen kierrosta voidaan muodostaa nykyistä tarkempi käsitys. Jatkoselvityksissä on tärkeää



arvioida sekä metsäisten suojelualueiden että niitä ympäröivien talousmetsien hiilensidontapotentiaalia muuttuvassa ilmastossa. Yhdistämällä hiilitasearviot luonnon monimuotoisuutta kuvaaviin paikkatietoaineistoihin voidaan tutkia hiilensidonnan ja luontoarvojen yhteisvaihtelua. Tulosten avulla voidaan tunnistaa sekä ilmastohyödyiltään että luontoarvoiltaan parhaita kohteita suojelualuesuunnittelussa.

## VIITTEET

- Aakala, T. (2010) Coarse woody debris in late-successional *Picea abies* forests in northern Europe: Variability in quantities and models of decay class dynamics. *Forest Ecology and Management* 260: 770-779.
- Aalto, J., Riihimäki, H., Meineri, E., Hylander, K. & Luoto, M. (2017) Revealing topoclimatic heterogeneity using meteorological station data. *International Journal of Climatology* 37: 544-556.
- Aapala, K., Similä, M. & Penttinen, J. (toim.) (2013) Ojitettujen soiden ennallistamisopas. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 188: 1-301.
- Aapala, K., Akujärvi, A., Heikkinen, R.K., Kuhmonen, A., Kuusela, S., Leikola, N., Mikkonen, N., Ojala, O., Punttila, P., Pöyry, J., Raunio, A., Syrjänen, K., Vihervaara, P. & Virkkala, R. (2017) Suojelualueverkosto muuttuvassa ilmastossa – esiselvitys. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 23/2017.
- Aapala, K., Alanen, A., Eisto, K., Kuusela, S. & Siikamäki, P. (toim.) 2018. Ennallistaminen ja luonnonhoito muuttuvassa ilmastossa – työpajamuistio. 16s. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B7CA85BE4-15B0-4042-AC89-D8E3AF20704B%7D/143428>
- ACIA (2004) Impacts of a Warming Arctic; Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ackerly, D.D., Loarie, S.R., Cornwell, W.K., Weiss, S.B., Hamilton, H., Branciforte, R. & Kraft, N.J.B. (2010) The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16: 476-487.
- Ahola, M. & Havumäki, M. 2008. Purokunnostusopas - Käsikirja metsäpurojen kunnostajille. Ympäristöopas. Kainuun ympäristökeskus, Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus. 89 s.
- Araújo, M.B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogues-Bravo, D. & Thuiller, W. (2011) Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14: 484-492.
- Araújo, M.B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L., Williams, P.H. (2004) Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology* 10, 1618-1626.
- Araújo, M.B. & Luoto, M. (2007) The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 16:743-753.
- Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J. & Osborn, T.J. (2019) Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change* 155: 377-391.
- Barber, Q.E., Nielsen, S.E. & Hamann, A. (2016) Assessing the vulnerability of rare plants using climate change velocity, habitat connectivity, and dispersal ability: a case study in Alberta, Canada. *Regional Environmental Change* 16: 1433-1441.
- Batllori, E., Parisien, M.-A., Parks, S.A., Moritz, M.A. & Miller, C. (2017) Potential relocation of climatic environments suggests high rates of climate displacement within the North American protection network. *Global Change Biology* 23: 3219-3230.
- Belote, R.T., Carroll, C., Martinuzzi, S., Michalak, J., Williams, J.W., Williamson, M.A. & Aplet, G.H. (2018) Assessing agreement among alternative climate change projections to inform conservation recommendations in the contiguous United States. *Scientific Reports* 8: 9441.
- Bernaschini, M.L., Trumper, E., Valladares, G. & Salvo, A. (2019) Are all edges equal? Microclimatic conditions, geographical orientation and biological implications in a fragmented forest. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 280: 142-151.
- Binkley, D., Stape, J., Ryan, M.G., Barnard, H.R. & Fownes, J. (2002) Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems* 5: 58-67.
- Borge, A. F., Westermann, S., Solheim, I. & Eitzelmüller, B. (2017) Strong degradation of palsas and peat plateaus in northern Norway during the last 60 years. *The Cryosphere* 11: 1–16.
- Bradshaw, C.J.A., Warkentin, I.G. & Sodhi, N.S., (2009) Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution* 24: 541-548.
- Brito-Morales, I., García Molinos, J., Schoeman, D.S., Burrows, M.T., Poloczanska, E.S., Brown, C.J., Ferrer, S., Harwood, T.D., Klein, C.J., McDonald-Madden, E., Moore, P.J., Pandolfi, J.M., Watson, J.E.M., Wenger, A.S. & Richardson, A.J. (2018) Climate Velocity Can Inform Conservation in a Warming World. *Trends in Ecology & Evolution* 33: 441-457.
- Burrows, M.T., Schoeman, D.S., Buckley, L.B., Moore, P., Poloczanska, E.S., Brander, K.M., Brown, C., Bruno, J.F., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C.V., Kiessling, W., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F.B., Sydeman, W.J. & Richardson, A.J. (2011) The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems. *Science* 334: 652-655.
- Burrows, M.T., Schoeman, D.S., Richardson, A.J., Molinos, J.G., Hoffmann, A., Buckley, L.B., Moore, P.J., Brown, C.J., Bruno, J.F., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel, C.V., Kiessling, W., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Sydeman, W.J., Ferrer, S., Williams, K.J. & Poloczanska, E.S. (2014) Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature* 507: 492.
- Buse, J., Boch, S., Hilgers, J. & Griebler, E.M. (2015) Conservation of threatened habitat types under future climate change – Lessons from plant-distribution models and current extinction trends in Southern Germany. *Journal for Nature Conservation* 27: 18-25.

- Butchart, S.H.M., Scharlemann, J.P.W., Evans, M.I., Quader, S., Aricò, S., Arinaitwe, J., Balman, M., Ben-  
nun, L.A., Bertzky, B., Besançon, C., Boucher, T.M., Brooks, T.M., Burfield, I.J., Burgess, N.D., Chan,  
S., Clay, R.P., Crosby, M.J., Davidson, N.C., De Silva, N., Devenish, C., Dutton, G.C.L., Fernández,  
D.F.D.z., Fishpool, L.D.C., Fitzgerald, C., Foster, M., Heath, M.F., Hockings, M., Hoffmann, M., Knox,  
D., Larsen, F.W., Lamoreux, J.F., Loucks, C., May, I., Millett, J., Molloy, D., Morling, P., Parr, M., Ric-  
ketts, T.H., Seddon, N., Skolnik, B., Stuart, S.N., Upgren, A., Woodley, S. (2012) Protecting Important  
Sites for Biodiversity Contributes to Meeting Global Conservation Targets. *Plos One* 7: e32529.
- Cahill, A.E., Aiello-Lammens, M.E., Fisher-Reid, M.C., Hua, X., Karanewsky, C.J., Yeong Ryu, H.,  
Sbeglia, G.C., Spagnolo, F., Waldron, J.B., Warsi, O., Wiens, J.J. (2013) How does climate change cause  
extinction? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280.
- Carroll, C., Lawler, J.J., Roberts, D.R., Hamann, A. (2015) Biotic and Climatic Velocity Identify Contrasting  
Areas of Vulnerability to Climate Change. *Plos One* 10: e0140486.
- Case, M.J., Lawler, J.J. & Tomasevic, J.A. (2015) Relative sensitivity to climate change of species in north-  
western North America. *Biological Conservation* 187: 127-133.
- Ciais, P., Tan, J., Wang, X., Roedenbeck, C., Chevallier, F., Piao, S.L., Moriarty, R., Broquet, G., Le Quere,  
C., Canadell, J.G., Peng, S., Poulter, B., Liu, Z., Tans, P., (2019) Five decades of northern land carbon  
uptake revealed by the interhemispheric CO2 gradient. *Nature* 568: 221-225.
- Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I., Prentice, I.C., Mace, G.M. (2011) Beyond Predictions: Biodiversity  
Conservation in a Changing Climate. *Science* 332: 53-58.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E.S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K.A.,  
Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Garibaldi, L.A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley,  
G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers,  
B., Chowdhury, R.R., Shin, Y.-J., Visseren-Hamakers, L., Willis, K.J., & Zayas, C.N. (2019) Pervasive  
human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366:  
eaax3100.
- de Groot, W. J., Flannigan, M. D. & Cantin, A. S. (2013) Climate change impacts on future boreal fire  
regimes. *Forest Ecology and Management* 294: 35-44.
- Dobrowski, S.Z. (2011) A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global  
Change Biology* 17: 1022-1035.
- Dobrowski, S.Z., Abatzoglou, J., Swanson, A.K., Greenberg, J.A., Mynsberge, A.R., Holden, Z.A. &  
Schwartz, M.K. (2013) The climate velocity of the contiguous United States during the 20th century.  
*Global Change Biology* 19: 241-251.
- Ewers, R.M., Didham, R.K. (2006) Confounding factors in the detection of species responses to habitat  
fragmentation. *Biological Reviews* 81: 117-142.
- Foden, W.B., Butchart, S.H.M., Stuart, S.N., Vié, J.-C., Akçakaya, H.R., Angulo, A., DeVantier, L.M.,  
Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S.D., Katariya, V., Bernard, R., Holland, R.A., Hughes, A.F.,  
O'Hanlon, S.E., Garnett, S.T., Şekercioğlu, Ç.H., Mace, G.M. (2013) Identifying the World's Most  
Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians  
and Corals. *Plos One* 8: e65427.
- Foden, W.B., Young, B.E., Akçakaya, H.R., Garcia, R.A., Hoffmann, A.A., Stein, B.A., Thomas, C.D.,  
Wheatley, C.J., Bickford, D., Carr, J.A., Hole, D.G., Martin, T.G., Pacifici, M., Pearce-Higgins, J.W.,  
Platts, P.J., Visconti, P., Watson, J.E.M., Huntley, B. (2019) Climate change vulnerability assessment of  
species. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 10: e551.
- Fronzek, S. (2013) Climate change and the future distribution of palustrine wetlands: ensemble modelling,  
probabilities and uncertainties. *Monographs of the Boreal Environment Research* 44. 35 s
- Garcia, R.A., Cabeza, M., Rahbek, C., Araújo, M.B. (2014) Multiple Dimensions of Climate Change and  
Their Implications for Biodiversity. *Science* 344: 1247-1249.
- Gardali, T., Seavy, N.E., DiGaudio, R.T., Comrack, L.A. (2012) A Climate Change Vulnerability Assess-  
ment of California's At-Risk Birds. *Plos One* 7: e29507.
- Gillingham, P.K., Bradbury, R.B., Roy, D.B., Anderson, B.J., Baxter, J.M., Bourn, N.A.D., Crick, H.Q.P.,  
Findon, R.A., Fox, R., Franco, A., Hill, J.K., Hodgson, J.A., Holt, A.R., Morecroft, M.D., O'Hanlon,  
N.J., Oliver, T.H., Pearce-Higgins, J.W., Procter, D.A., Thomas, J.A., Walker, K.J., Walmsley, C.A.,  
Wilson, R.J., Thomas, C.D. (2015) The effectiveness of protected areas in the conservation of species  
with changing geographical ranges. *Biological Journal of the Linnean Society* 115: 707-717.
- Gillson, L., Dawson, T.P., Jack, S., McGeoch, M.A. (2013) Accommodating climate change contingencies  
in conservation strategy. *Trends in Ecology & Evolution* 28: 135-142.
- Gimona, A., Poggio, L., Brown, I., Castellazzi, M. (2012) Woodland networks in a changing climate:  
Threats from land use change. *Biological Conservation* 149: 93-102.
- Gower, S.T., McMurtrie, R.E. & Murty, D. (1996) Aboveground net primary production decline with  
stand age: potential causes. *Trends in Ecology & Evolution* 11(9): 378-382.
- Hamann, A., Roberts, D.R., Barber, Q.E., Carroll, C. & Nielsen, S.E. (2015) Velocity of climate change  
algorithms for guiding conservation and management. *Global Change Biology* 21: 997-1004.
- Hamilton, C.M., Martinuzzi, S., Plantinga, A.J., Radeloff, V.C., Lewis, D.J., Thogmartin, W.E., Heglund,  
P.J., Pidgeon, A.M. (2013) Current and future land use around a nationwide protected area network.  
*Plos One* 8: e55737-e55737.
- Hannah, L. (2008) Protected Areas and Climate Change. *Annals of the New York Academy of Sciences*  
1134: 201-212.

- Hannah, L., Flint, L., Syphard, A.D., Moritz, M.A., Buckley, L.B., McCullough, I.M. (2014) Fine-grain modeling of species' response to climate change: holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in Ecology & Evolution* 29: 390-397.
- Hansen, A.J., DeFries, R. (2007) Ecological mechanisms linking protected areas to surrounding lands. *Ecological Applications* 17: 974-988.
- Hansen, A.J., Piekielek, N., Davis, C., Haas, J., Theobald, D.M., Gross, J.E., Monahan, W.B., Olliff, T., Running, S.W. (2014) Exposure of U.S. National Parks to land use and climate change 1900–2100. *Ecological Applications* 24: 484-502.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R. (2012) Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, E2415-E2423.
- Harris, J.A., Hobbs, R.J., Higgs, E. & Aronson, J. (2006) Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology* 14: 170-176.
- Heath, M.F. & Evans, M.I., (toim.) (2000) Important Bird Areas in Europe: Priority sites for conservation. - 2 vols. Cambridge, UK: BirdLife International (BirdLife Conservation Series No. 8).
- Heikkinen, R.K., Leikola, N., Aalto, J., Aapala, K., Kuusela, S., Luoto, M., & Virkkala, R. (2020) Fine-grained climate velocities reveal vulnerability of protected areas to climate change. *Scientific Reports*, 10: 1678
- Heikkinen, R.K., Luoto, M., Araújo, M.B., Virkkala, R., Thuiller, W. & Sykes, M.T. (2006) Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography* 30: 751-777.
- Heikkinen, R., Pöyry, J., Fronzek, S., & Leikola, N. (2012) Ilmastomuutos ja vieraslajien leviäminen Suomeen – Tutkimustiedon synteesi ja suurilmastollinen vertailu. *Suomen ympäristö 7/2012*.
- Heller, N.E. & Zavaleta, E.S. (2009) Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142: 14-32.
- Hiley, J.R., Bradbury, R.B., Holling, M. & Thomas, C.D. (2013) Protected areas act as establishment centres for species colonizing the UK. - *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 280: 20122310.
- Hill, J.K., Thomas, C.D. & Huntley, B. (2003) Modeling present and potential future ranges of European butterflies using climate response surfaces. *Butterflies. Ecology and evolution taking flight* (ed. by C. Bogs, W. Watt and P. Ehrlich), pp. 149-167. The University of Chicago Press, Chicago.
- Holopainen, J., Helama, S., Lappalainen, H. & Gregow, H. (2013) Plant phenological records in northern Finland since the 18th century as retrieved from databases, archives and diaries for biometeorological research. *International Journal of Biometeorology* 57: 423-435.
- Hopkins, J.J., Allison, H.M., Walmsley, C.A., Gaywood, M. & Thurgate, G. (2007) Conserving biodiversity in a changing climate: guidance on building capacity to adapt. Defra on behalf of the UK Biodiversity Partnership. 32 pp.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Barr, A.G., Kljun, N., Black, T.A. & McCaughey, J.H. (2016) Monitoring boreal forest biomass and carbon storage change by integrating airborne laser scanning, biometry and eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment* 181: 82-95.
- Huntley, B., Collingham, Y.C., Willis, S.G. & Green, R.E. (2008) Potential Impacts of Climatic Change on European Breeding Birds. *Plos One* 3: e1439.
- Hyvärinen, E., Juslén, A., Kemppainen, E., Uddström, A. & Liukko, U.-M. (toim.) (2019). Suomen lajien uhanalaisuus. Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 704 s.
- Häkkilä, M., Le Tortorec, E., Brotons, L., Rajasärkkä, A., Tornberg, R. & Mönkkönen, M. (2017) Degradation in landscape matrix has diverse impacts on diversity in protected areas. - *Plos One* 12: e0184792.
- Ilmasto-opas (2019 a) [<http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/16266ad3-e5f5-4987-8760-2b74655182d5/suomen-ilmasto-on-lammennyt.html>]
- Ilmasto-opas (2019 b) [<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/dfe79a73-08ea-4686-8463-811b87f53e44/lampotilat-kohoavat.html>]
- IPBES (2018) The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 pp.
- IPBES (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages.
- IPCC (2019a) Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019b) IPCC Special Report on the ocean and cryosphere in a changing climate. <https://www.ipcc.ch/report/srocc/>

- Jackson, S.T., Betancourt, J.L., Booth, R.K. & Gray, S.T. (2009) Ecology and the ratchet of events: Climate variability, niche dimensions, and species distributions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 19685-19692.
- Jansson, R., Ström, L. & Nilsson, C. (2019) Smaller future floods imply less habitat for riparian plants along a boreal river. *Ecological Applications* 29: e01977. 15 pp.
- Johnston, A., Ausden, M., Dodd, A.M., Bradbury, R.B., Chamberlain, D.E., Jiguet, F., Thomas, C.D., Cook, A.S.C.P., Newson, S.E., Ockendon, N., Rehlich, M.M., Roos, S., Thaxter, C.B., Brown, A., Crick, H.Q.P., Douse, A., McCall, R.A., Pontier, H., Stroud, D.A., Cadiou, B., Crowe, O., Deceuninck, B., Hornman, M. & Pearce-Higgins, J.W. (2013) Observed and predicted effects of climate change on species abundance in protected areas. *Nature Climate Change* 3: 1055-1061.
- Jonzén, N., Lindén, A., Ergon, T., Knudsen, E., Vik, J. O., Rubolini, D., Piacentini, D., Brinch, C., Spina, F., Karlsson, L., Stervander, M., Andersson, A., Waldenström, J., Lehikoinen, A., Edvardsen, E., Solvang, R. & Stenseth, N. C. (2006) Rapid advance of spring arrival dates in long-distance migratory birds. *Science* 312: 1959-1961.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J. & Fronzek, S. (2012) Ilmasto muuttuu Suomessa. Ss. 16-23 teoksessa Ruuhela, R. (toim.): Miten väistämättömään ilmastomuutokseen voidaan varautua? – yhteenveto suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Maa- ja metsätalousministeriö. MMM:n julkaisuja, 6/2011.
- Jyväsjärvi, J., Marttila, H., Rossi, P. M., Ala-Aho, P., Olofsson, B., Nisell, J., Backman, B., Ilmonen, J., Virtanen, R., Paasivirta, L., Britschgi, R., Klove, B. & Muotka, T. (2015) Climate-induced warming imposes a threat to north European spring ecosystems. *Global Change Biology* 21: 4561-4569.
- Kaakinen, E., Kokko, A., Aapala, K., Autio, O., Eurola, S., Hotanen, J.-P., Kondelin, H., Lindholm, T., Nousiainen, H., Rehell, S., Ruuhijärvi, R., Sallantausta, T., Salminen, P., Tahvanainen, T., Tuominen, S., Turunen, J., Vasander, H. & Virtanen, K. 2018. Suot. Julk.: Kontula T., Raunio A. (eds.), Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja. Osa 2 - luontotyyppien kuvaukset. Helsinki, Helsinki, Suomen ympäristökeskus : Ympäristöministeriö. Ss. 321-474. Suomen Ympäristö; 2018, 5.
- Kalliokoski, T., Mäkelä, A., Fronzek, S., Minunno, F. & Peltoniemi, M. (2018) Decomposing sources of uncertainty in climate change projections of boreal forest primary production. *Agricultural and Forest Meteorology* 262: 192-205.
- Kellomäki, S., Peltola, H., Nuutinen, T., Korhonen, T. & Strandman, H. (2008) Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363: 2339-2349.
- Kira, T. & Shidei, T. (1967) Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Japanese Journal of Ecology* 17: 70-87.
- Kolari, P., Pumpanen, J., Rannik, Ü., Ilvesniemi, H., Hari, P. & Berninger, F. (2004) Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Global Change Biology* 10: 1106-1119.
- Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). (2018) Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus ja ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018. 388 s
- Kosanic, A., Kavcic, I., van Kleunen, M. & Harrison, S. (2019) Climate change and climate change velocity analysis across Germany. *Scientific Reports* 9: 2196.
- Kotiaho, J., Niemelä, J., Sääksjärvi, I., Schulman, L., Mönkkönen, M., Boström, C., Jutila, H., Halme, P., Koljonen, S., Oldén, A., Kontula, T. & Hautakangas, S. (2019) Elonkirjo ehtyy – Suosituksia luonnon monimuotoisuuden turvaamiseksi. JYU. WISDOM, Wisdom letters, 1/2019. [https://www.jyu.fi/en/research/wisdom/letters/jyu\_wisdom\_letter\_1\_2019.pdf]
- Kujala, H., Araújo, M.B., Thuiller, W. & Cabeza, M. (2011) Misleading results from conventional gap analysis - Messages from the warming north. *Biological Conservation* 144: 2450-2458.
- Kurz, W.A., Shaw, C.H., Boisvenue, C., Stinson, G., Metsaranta, J., Leckie, D., Dyk, A., Smyth, C. & Neilson, E.T. (2013) Carbon in Canada's boreal forest — A synthesis. *Environmental Reviews* 21: 260-292.
- Kuuluvainen, T. & Gauthier, S. (2018) Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change. *Forest Ecosystems* 5:26.
- Lawler, J.J., Ackerly, D.D., Albano, C.M., Anderson, M.G., Dobrowski, S.Z., Gill, J.L., Heller, N.E., Pressey, R.L., Sanderson, E.W. & Weiss, S.B. (2015) The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change. *Conservation Biology* 29: 618-629.
- Lawler, J.J., Tear, T.H., Pyke, C., Shaw, M.R., Gonzalez, P., Kareiva, P., Hansen, L., Hannah, L., Klausmeyer, K., Aldous, A., Bienz, C. & Pearsall, S. (2010) Resource management in a changing and uncertain climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8: 35-43.
- Lehikoinen, A. & Virkkala, R. (2016) North by northwest: climate change and directions of density shifts in birds. *Global Change Biology* 22: 1121-1129.
- Lehikoinen, P., Santangeli, A., Jaatinen, K., Rajasärkkä, A. & Lehikoinen, A. (2019) Protected areas act as a buffer against detrimental effects of climate change - Evidence from large-scale, long-term abundance data. *Global Change Biology* 25: 304-313.
- Lehtomaa, L., Ahonen, I., Hakamäki, H., Häggblom, M., Jutila, H., Järvinen, C., Kempainen, R., Kondelin, H., Laitinen, T., Lipponen, M., Mussaari, M., Pessa, J., Raatikainen, K.J., Raatikainen, K., Tuominen, S., Vainio, M., Vieno, M. & Vuomajoki, M. (2018) Perinnebiotoopit. Julk.: Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018. 225-254.



- Lehtonen, I. (2017) Projected climate change impact on fire risk and heavy snow loads in the Finnish forests. *Finnish Meteorological Institute Contributions* 133: 1-36.
- Lehtonen, I. & Jylhä, K. (2019) Tendency towards a more extreme precipitation climate in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Atmospheric Science Letters* 0: e895.
- Lehtonen, I. & Pirinen, P. (2019) An exceptionally warm thermal growing season in Finland. *FMI's Climate Bulletin: Research Letters* 1/2019. [<https://doi.org/10.35614/ISSN-2341-6408-IK-2019-03-RL>]
- Leinonen, R., Pöyry, J., Söderman, G. & Tuominen-Roto, L. (2016) Suomen yöperhosseuranta (Nocturna) 1993–2012. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja*, 15/2016.
- Leinonen, R., Pöyry, J., Söderman, G. & Tuominen-Roto, L. (2017) Suomen yöperhosyhteisöt muutoksessa – valtakunnallisen yöperhosseurannan keskeisiä tuloksia 1993-2012. *Baptia* 42: 74-92.
- Lenoir, J., Hattab, T. & Pierre, G. (2017) Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography* 40: 253-266.
- Lilja, A., Hantula, J., Rytönen, A., Müller, M., Parikka, P., Pouttu, A. & Kurkela, T. (2010) Vieras- ja tulokaslajit tautien aiheuttajina metsäpuilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2010: 283-301.
- Lind, L. & Nilsson, C. (2015) Vegetation patterns in small boreal streams related to ice and winter floods. *Journal of Ecology* 103: 431-440.
- Lind, L., Nilsson, C., Polvi, L.E. & Weber, C. (2014) The role of ice dynamics in shaping vegetation in flowing waters. *Biological Reviews* 89: 791-804.
- Lindberg, H. (2017) Kangasmetsien paloainesten luokittelu ja kosteusvaihtelu metsäpaloontorjunnan ja kulotusten kehittämisen kannalta. *Lisensiaatintutkimus, Helsingin yliopisto, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, Metsätieteiden laitos*. 21 s
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstrom, M., Lexer, M.J. & Marchetti, M. (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259(4): 698-709.
- Liu, Z., Kimball, J.S., Parazoo, N.C., Ballantyne, A.P., Wang, W.J., Madani, N., Pan, C.G., Watts, J.D., Reichle, R.H., Sonnentag, O., Marsh, P., Hurkuck, M., Helbig, M., Quinton, W.L., Zona, D., Ueyama, M., Kobayashi, H. & Euskirchen, E.S. (2019) Increased high-latitude photosynthetic carbon gain offset by respiration carbon loss during an anomalous warm winter to spring transition. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.14863
- Loarie, S.R., Duffy, P.B., Hamilton, H., Asner, G.P., Field, C.B. & Ackerly, D.D. (2009) The velocity of climate change. *Nature* 462: 1052-1055.
- Luonnonvarakeskus (2019) Metsien suojelu 1.1.2019. [[https://stat.luke.fi/metsien-suojelu-112019\\_fi](https://stat.luke.fi/metsien-suojelu-112019_fi)]
- Luoto, M., Heikkinen, R.K., & Carter, T.R. (2004) Loss of palsa mires in Europe and biological consequences. *Environmental Conservation* 31: 30-37.
- Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P. & Grace, J. (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455(7210): 213-215.
- Maclean, I.M.D. & Wilson, R.J. (2011) Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108: 12337-12342.
- Markkula, I., Turunen, M. & Rasmus, S. (2019) A review of climate change impacts on the ecosystem services in the Saami Homeland in Finland. *Science of the Total Environment* 692: 1070–1085.
- Markovic, D., Carrizo, S. F., Kärcher, O., Walz, A., David, J. N W. (2017) Vulnerability of European freshwater catchments to climate change. *Global Change Biology* 23: 3567-3580.
- Martinuzzi, S., Radeloff, V.C., Joppa, L.N., Hamilton, C.M., Helmers, D.P., Plantinga, A.J. & Lewis, D.J. (2015) Scenarios of future land use change around United States' protected areas. *Biological Conservation* 184: 446-455.
- Matlack, G.R. (1993) Microenvironment variation within and among forest edge sites in the eastern United States. *Biological Conservation* 66: 185-194.
- Mawdsley, J.R., O'Malley, R. & Ojima, D.S. (2009) A Review of Climate-Change Adaptation Strategies for Wildlife Management and Biodiversity Conservation. *Conservation Biology* 23: 1080-1089.
- Mazziotta, A., Mönkkönen, M., Strandman, H., Routa, J., Tikkanen, O. P. & Kellomäki, S. (2014) Modeling the effects of climate change and management on the dead wood dynamics in boreal forest plantations. *European Journal of Forest Research* 133: 405-421.
- Mazziotta, A., Triviño, M., Tikkanen, O., Kouki, J., Strandman, H. & Mönkkönen, M. (2015) Applying a framework for landscape planning under climate change for the conservation of biodiversity in the Finnish boreal forest. *Global Change Biology* 21: 637-651.
- Mazziotta, A., Triviño, M., Tikkanen, O., Kouki, J., Strandman, H. & Mönkkönen, M. (2016) Habitat associations drive species vulnerability to climate change in boreal forests. *Climatic Change* 135: 585-595.
- Melillo, J.M., Lu, X., Kicklighter, D.W., Reilly, J.M., Cai, Y. & Sokolov, A.P. (2016) Protected areas' role in climate-change mitigation. *Ambio* 45: 133-145.
- Mikkonen, S., Laine, M., Mäkelä, H. M., Gregow, H., Tuomenvirta, H., Lahtinen, M. & Laaksonen, A. (2015) Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29: 1521-1529.
- Minunno, F., Peltoniemi, M., Härkönen, S., Kalliokoski, T., Mäkinen, H. & Mäkelä, A. 2019. Bayesian calibration of a carbon balance model PREBAS using data from permanent growth experiments and national forest inventory. *Forest Ecology and Management* 440: 208-257.



- Minunno, F., Peltoniemi, M., Launiainen, S., Aurela, M., Lindroth, A., Lohila, A., Mammarella, I., Minkinen, K. & Mäkelä, A. (2016) Calibration and validation of a semi-empirical flux ecosystem model for coniferous forests in the Boreal region. *Ecological Modelling* 341: 37-52.
- Mustonen, K.R., Mykrä, H., Marttila, H., Sarremejane, R., Veijalainen, N., Sippel, K., Muotka, T., Hawkins, C. P. (2018) Thermal and hydrologic responses to climate change predict marked alterations in boreal stream invertebrate assemblages. *Global Change Biology* 24: 2434-2446.
- Mäkelä, A., Landsberg, J., Ek, A.R., Burk, T.E., Ter-Mikaelian, M., Agren, G.I., Oliver, C.D. & Puttonen, P. (2000) Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20(5-6): 289-298.
- Mäkelä, A. & Valentine, H.T. (2001) The ratio of NPP to GPP: evidence of change over the course of stand development. *Tree Physiology* 21(14): 1015-1030.
- Mäkelä, H. (2015) Estimates of past and future forest fire danger in Finland from a climatological viewpoint. *Finnish Meteorological Institute Contributions* 112: 1-45.
- Nadeau, C.P., Fuller, A.K. & Rosenblatt, D.L. (2015) Climate-smart management of biodiversity. *Ecosphere* 6: art91.
- Niittynen, P., Heikkinen & R., Luoto, M. (2018) Snow cover is a neglected driver of Arctic biodiversity loss. *Nature Climate Change* 8: 997-1001.
- Nilsson, C., Jansson, R., Kuglerova, L., Lind, L., Ström, L. (2013) Boreal Riparian Vegetation Under Climate Change. *Ecosystems* 16: 401-410.
- Niskanen, A., Niittynen, P., Aalto, J., Väre, H. & Luoto, M. (2019) Lost at High Latitudes: Arctic and Endemic Plants Under Threat as Climate Warms. *Diversity and Distributions* 25: 809-821.
- Núñez, T.A., Lawler, J.J., McRae, B.H., Pierce, D.J., Krosby, M.B., Kavanagh, D.M., Singleton, P.H. & Tewksbury, J.J. (2013) Connectivity Planning to Address Climate Change. *Conservation Biology* 27: 407-416.
- Odum, E.P. (1969) *The strategy of ecosystem development*, pp. 262.
- Oliver, T.H. & Morecroft, M.D. (2014) Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5: 317-335.
- Ordonez, A., Martinuzzi, S., Radeloff, V.C. & Williams, J.W. (2014) Combined speeds of climate and land-use change of the conterminous US until 2050. *Nature Climate Change* 4: 811.
- Pacifici, M., Foden, W.B., Visconti, P., Watson, J.E.M., Butchart, S.H.M., Kovacs, K.M., Scheffers, B.R., Hole, D.G., Martin, T.G., Akcakaya, H.R., Corlett, R.T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J.A., Hoffmann, A.A., Midgley, G.F., Pearce-Kelly, P., Pearson, R.G., Williams, S.E., Willis, S.G., Young, B. & Rondinini, C. (2015) Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change* 5: 215-224.
- Palmer, M.A., Reidy Liermann, C., Nilsson, C., Flörke, M., Alcamo, J., Lake, S. & Bond, N. (2008) Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 81-89.
- Peichl, M., Brodeur, J.J., Khomik, M. & Arain, M.A. (2010) Biometric and eddy-covariance based estimates of carbon fluxes in an age-sequence of temperate pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 952-965.
- Peltoniemi, M. & Mäkipää, R. (2011) Quantifying distance-independent tree competition for predicting Norway spruce mortality in unmanaged forests. *Forest Ecology and Management* 261: 30-42.
- Perry, L.G., Reynolds, L.V., Beechie, T., Collins, M.J. & Shafroth, P.B. (2015) Incorporating climate change projections into riparian restoration planning and design. *Ecology* 8: 863-879.
- Post, E., Forchhammer, M.C., Bret-Harte, M.S., Callaghan, T.V., Christensen, T.R., Elberling, B., Fox, A.D., Gilg, O., Hik, D.S., Høye, T.T., Ims, R.A., Jeppesen, E., Klein, D.R., Madsen, J., McGuire, A.D., Rysgaard, S., Schindler, D.E., Stirling, I., Tamstorf, M.P., Tyler, N.J.C., van der Wal, R., Welker, J., Wookey, P.A., Schmidt, N.M. & Aastrup, P. (2009) Ecological Dynamics Across the Arctic Associated with Recent Climate Change. *Science* 325: 1355-1358.
- Pöyry, J. & Apala, K. (toim.) (2020) *Lajit ja luontotyypit muuttuvassa ilmastossa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 2/2020.*
- Pöyry, J., Luoto, M., Heikkinen, R. K., Kuussaari, M. & Saarinen, K. (2009) Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. *Global Change Biology* 15: 732-743.
- Radeloff, V.C., Stewart, S.I., Hawbaker, T.J., Gimmi, U., Pidgeon, A.M., Flather, C.H., Hammer, R.B. & Helmers, D.P. (2010) Housing growth in and near United States protected areas limits their conservation value. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 940-945.
- Rannow, S., Macgregor, N.A., Albrecht, J., Crick, H.Q.P., Förster, M., Heiland, S., Janauer, G., Morecroft, M.D., Neubert, M., Sarbu, A. & Sienkiewicz, J. (2014) Managing Protected Areas Under Climate Change: Challenges and Priorities. *Environmental Management* 54: 732-743.
- Rassi, P., Alanen, A., Kanerva, T., Mannerkoski, I., (toim.) (2001) *Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen Kirja 2000*. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 432 s.
- Rassi, P., Hyvärinen, E., Juslén, A. & Mannerkoski, I. (toim.) (2010) *Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2010*. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 685 s.
- Rempel, R.S. & Hornseth, M.L. (2017) Binational climate change vulnerability assessment of migratory birds in the Great Lakes Basins: Tools and impediments. *Plos One* 12: e0172668.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. (2016a) Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica* 51: 17-50.

- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. & Pirinen, P. (2016b) Terminen kasvu-kausi lämpenevässä ilmastossa. *Terra* 2016: 3-15.
- Ruuhela, R. (toim.) (2012) Miten väistämättömään ilmastomuutokseen voidaan varautua? – yhteenveto suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Maa- ja metsätalousministeriö. MMM:n julkaisuja 6/2011. 176 s.
- Ruuhijärvi, R. (2018) Ilmastomuutoksen mahdollisia vaikutuksia suokasvillisuudessa. Julk.: Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). Suomen luontotyyppejen uhanalaisuus 2018. Luontotyyppejen punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018. s. 150–151.
- Ryan, M.G., Binkley, D., Fownes, J.H., Giardina, C.P. & Senock, R.S. (2004) An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. *Ecological Monographs* 74: 393-414.
- Santangeli, A., Rajasärkkä, A. & Lehikoinen, A. (2017) Effects of high latitude protected areas on bird communities under rapid climate change. *Global Change Biology* 23: 2241-2249.
- Segan, D.B., Murray, K.A., Watson, J.E.M. (2016) A global assessment of current and future biodiversity vulnerability to habitat loss–climate change interactions. *Global Ecology and Conservation* 5: 12-21.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A. & Reyer, C. P. O. (2017) Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7: 395-402.
- Sieck, M., Ibsch, P.L., Moloney, K.A. & Jeltsch, F. (2011) Current models broadly neglect specific needs of biodiversity conservation in protected areas under climate change. *BMC Ecology* 11: 12.
- Similä, M. & Junninen, K. (2011) Metsien ennallistamisen ja luonnonhoidon opas. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 157: 1-191.
- Skov, F. & Svenning, J.-C. (2004) Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecography* 27: 366-380.
- Smith, M.D. (2011) The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *Journal of Ecology* 99: 651-655.
- Smith, F.W. & Long, J.N. (2001) Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management* 144: 175-181.
- Soja, A. J., Tchepakova, N. M., French, N. H. F., Flannigan, M. D., Shugart, H. H., Stocks, B. J., Sukhinin, A. I., Parfenova, E. I., Chapin III, F. S. & Stackhouse Jr, P. W. (2007) Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change* 56: 274-296.
- Sollid, J. L. & Sørbel, L. (1998) Palsa bogs as a climate indicator – examples from Dovrefjell, Southern Norway. *Ambio* 27: 287-291
- Speziale, K. L. & Ezcurra, C. (2015) Rock outcrops as potential biodiversity refugia under climate change in North Patagonia. *Plant Ecology & Diversity* 8: 353–361.
- Stagl, J., Hattermann, F.F. & Vohland, K. (2015) Exposure to climate change in Central Europe: What can be gained from regional climate projections for management decisions of protected areas? *Regional Environmental Change* 15: 1409-1419.
- Ström, L., Jansson, R. & Nilsson, C. (2012) Projected changes in plant species richness and extent of riparian vegetation belts as a result of climate-driven hydrological change along the Vindel River in Sweden. *Freshwater Biology* 57: 49-60.
- Ström, L., Jansson, R., Nilsson, C., Johansson, M. & Xiong, S. (2011) Hydrologic effects on riparian vegetation in a boreal river: an experiment testing climate change predictions. *Global Change Biology* 17: 254-267.
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J.B., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Bennie, J.J., Crick, H.Q.P., Duffield, S., Fox, R., Hopkins, J.J., Macgregor, N.A., Morecroft, M.D., Walker, K.J. & Maclean, I.M.D. (2018) Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change* 8: 713-717.
- Sykes, M.T., Prentice, I.C. & Cramer, W. (1996) A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography* 23: 203-233.
- Tahvanainen, T., Bland, L., Granlund, L., Gunnarsson, U., Keith, D., Kolari, T., Kumpula, T., Kuznetsov, O., Marttila, H., Murray, N., Sallinen, A. & Tuominen, S. (2018) Multidisciplinary assessment of European aapa mire ecosystem changes. 5th European Congress of Conservation Biology. doi: 10.17011/conference/eccb2018/107749
- Tainio, A., Heikkinen, R. K., Heliölä, J., Hunt, A., Watkiss, P., Fronzek, S., Leikola, N., Lötjönen, S., Mashkina, O. & Carter, T. R. (2016) Conservation of grassland butterflies in Finland under a changing climate. *Regional Environmental Change* 16: 71-84.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A. (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American meteorological Society* 93: 485-498.
- Thom, D. & Seidl, R. (2016) Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews* 91: 760-781.
- Thomas, C.D., Anderson, B.J., Moilanen, A., Eigenbrod, F., Heinemeyer, A., Quaipe, T., Roy, D.B., Gilling, S., Armsworth, P.R. & Gaston, K.J. (2013) Reconciling biodiversity and carbon conservation. *Ecology Letters* 16: 39-47.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Ferreira de Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., Van Jaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Miles, L., Ortega-Huerta, M.A., Peterson, A.T., Phillips, O.L. & Williams, S.E. (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148.

- Thomas, C.D. & Gillingham, P.K. (2015) The performance of protected areas for biodiversity under climate change. *Biological Journal of the Linnean Society* 115: 718-730.
- Thomas, C.D., Gillingham, P.K., Bradbury, R.B., Roy, D.B., Anderson, B.J., Baxter, J.M., Bourn, N.A.D., Crick, H.Q.P., Findon, R.A., Fox, R., Hodgson, J.A., Holt, A.R., Morecroft, M.D., O'Hanlon, N.J., Oliver, T.H., Pearce-Higgins, J.W., Procter, D.A., Thomas, J.A., Walker, K.J., Walmsley, C.A., Wilson, R.J. & Hill, J.K. (2012) Protected areas facilitate species' range expansions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 14063-14068.
- Tiainen, J., Mikkola-Roos, M., Below, A., Jukarainen, A., Lehikoinen, A., Lehtiniemi, T., Pessa, J., Rajasärkkä, A., Rintala, J., Sirkiä, P. & Valkama, J. (2016) Suomen lintujen uhanalaisuus 2015 – The 2015 Red List of Finnish Bird Species. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus. 49 s.
- Timpano-Padgham, B.L., Beechie, T. & Klinger, T. (2017) A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration. *PLoS ONE* 12(3): e0173812.
- Tingley, M.W., Darling, E.S. & Wilcove, D.S. (2014) Fine- and coarse-filter conservation strategies in a time of climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1322: 92-109.
- Trochet, A. & Schmeller, D.S. (2013) Effectiveness of the Natura 2000 network to cover threatened species. *Nature Conservation* 4: 35-53.
- Tuomenvirta H., Haavisto R., Hildén M., Lanki T., Luhtala S., Meriläinen P., Mäkinen K., Parjanne A., Peltonen-Sainio P., Pilli-Sihvola K., Pöyry J., Sorvali J. & Veijalainen N. (2018) Sää- ja ilmastoriskit Suomessa - Kansallinen arvio. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 43/2018.
- Turunen, M., Mikkola, K., Neuvonen, S., Johansson, P., Anttonen, M., Norokorpi, Y., Saikkonen, A. & Mäkelä, K. (2018) Suomen tunturiluonto ja ilmastonmuutos. Ss. 287–298 teoksessa Kontula, T. & Raunio, A. (toim.): Suomen luontotyyppeiden uhanalaisuus 2018. Luontotyyppeiden punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018.
- VanDerWal, J., Murphy, H.T., Kutt, A.S., Perkins, G.C., Bateman, B.L., Perry, J.J. & Reside, A.E. (2013) Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change* 3: 239-243.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I. & Mäkelä, A. (2016) Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa [In Finnish with an English summary: The occurrence of weather conditions favouring widespread forest fires in Finland]. *Ilmatieteen laitos, Raportteja [Finnish Meteorological Institute, Reports]* 3/2016: 1-30.
- Vermaat, J.E., Hellmann, F.A., van Teeffelen, A.J.A., van Minnen, J., Alkemade, R., Billeter, R., Beierkuhnlein, L.B., Cabeza, M., Feld, C.K., Huntley, B., Paterson, J. & WallisDeVries, M.F. (2017) Differentiating the effects of climate change and land use change on European biodiversity: A scenario analysis. *Ambio* 46: 277–290.
- Weslien, J., Finér, L., Jónsson, J. A., Koivusalo, H., Laurén, A., Ranius, T. & Sigurdsson, B. D. (2009) Effects of increased forest productivity and warmer climates on carbon sequestration, run-off water quality and accumulation of dead wood in a boreal landscape: A modelling study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24: 333-347.
- Wiens, J.A., Seavy, N.E. & Jongsomjit, D. (2011) Protected areas in climate space: What will the future bring? *Biological Conservation* 144: 2119-2125.
- Williams, J.W. & Jackson, S.T. (2007) Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 475-482.
- Willis, K.J., Bennett, K.D., Bhagwat, S.A. & Birks, H.J.B. (2010) 4 °C and beyond: what did this mean for biodiversity in the past? *Systematics and Biodiversity* 8: 3-9.
- Willis, S.G., Foden, W., Baker, D.J., Belle, E., Burgess, N.D., Carr, J.A., Doswald, N., Garcia, R.A., Hartley, A., Hof, C., Newbold, T., Rahbek, C., Smith, R.J., Visconti, P., Young, B.E. & Butchart, S.H.M. (2015) Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation* 190: 167-178.
- Wilson, T.S., Sleeter, B.M. & Davis, A.W. (2015) Potential future land use threats to California's protected areas. *Regional Environmental Change* 15: 1051-1064.
- Virkkala, R., Aalto, J., Heikkinen, R.K., Rajasärkkä, A., Kuusela, S., Leikola, N. & Luoto, M. (2020) Can topographic variation in climate buffer against climate change-induced population declines in northern forest birds? *Diversity* 12: 56.
- Virkkala, R., Heikkinen, R.K., Fronzek, S., Kujala, H. & Leikola, N. (2013a) Does the protected area network preserve bird species of conservation concern in a rapidly changing climate? *Biodiversity and Conservation* 22: 459-482.
- Virkkala, R., Heikkinen, R.K., Fronzek, S. & Leikola, N. (2013b) Climate Change, Northern Birds of Conservation Concern and Matching the Hotspots of Habitat Suitability with the Reserve Network. - *PLoS ONE* 8: e63376.
- Virkkala R., Heikkinen R.K., Kuusela S., Leikola N. & Pöyry J. (2019) Significance of Protected Area Network in Preserving Biodiversity in a Changing Northern European Climate. Teoksessa: Leal Filho W., Barbir J., Preziosi R. (toim.) *Handbook of Climate Change and Biodiversity*, p. 377-390. Climate Change Management. Springer, Cham.
- Virkkala, R. & Lehikoinen, A. (2014) Patterns of climate-induced density shifts of species: poleward shifts faster in northern boreal birds than in southern birds. *Global Change Biology* 20: 2995-3003.
- Virkkala, R. & Lehikoinen, A. (2017) Birds on the move in the face of climate change: High species turnover in northern Europe. *Ecology and Evolution* 7: 8201-8209.

- Virkkala, R., Pöyry, J., Heikkinen, R.K., Lehikoinen, A. & Valkama, J. (2014) Protected areas alleviate climate change effects on northern bird species of conservation concern. *Ecology and Evolution* 4: 2991-3003.
- Virkkala, R. & Rajasärkkä, A. (2011) Climate change affects populations of northern birds in boreal protected areas. *Biology Letters* 7: 395-398.
- Virkkala, R., Rajasärkkä, A., Heikkinen, R.K., Kuusela, S., Leikola, N. & Pöyry, J. (2018) Birds in boreal protected areas shift northwards in the warming climate but show different rates of population decline. *Biological Conservation* 226:271-279.
- Zha, T., Barr, A.G., Black, T.A., McCaughey, J.H., Bhatti, J., Hawthorne, I., Krishnan, P., Kidston, J., Saigusa, N., Shashkov, A. & Nestic, Z. (2009) Carbon sequestration in boreal jack pine stands following harvesting. *Global Change Biology* 15: 1475-1487.
- Zhou, G., Liu, S., Li, Z., Zhang, D., Tang, X., Zhou, C., Yan, J. & Mo, J. (2006) Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science* 314(5804): 1417.
- Zuidhoff, F. S. & Kolstrup, E. (2000) Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laidalen, northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 55–69.





**ISBN 978-952-11-5119-4 (nid.)**

**ISBN 978-952-11-5120-0 (PDF)**

**ISSN 1796-1718 (pain.)**

**ISSN 1796-1726 (verkkoj.)**